

Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride

THÈSE N° 4083 (2008)

PRÉSENTÉE LE 23 MAI 2008

À LA FACULTE FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR
LABORATOIRE D'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE
PROGRAMME DOCTORAL EN ENERGIE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Blaise DESTRAZ

ingénieur électricien diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Essertes (VD)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. Y. Perriard, président du jury
Prof. A. Rufer, directeur de thèse
Prof. H. Bleuler, rapporteur
Prof. A. Bouscayrol, rapporteur
Dr G. Coquery, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2008

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au Laboratoire d'Electronique Industrielle dirigé par le Professeur Alfred Rufer. Il n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide d'un grand nombre de personnes auxquelles je dois toute ma reconnaissance.

Mes premiers remerciements sont adressés au Prof. A. Rufer, directeur de thèse, pour son soutien, son encadrement, sa confiance et son enthousiasme durant la totalité du temps que j'ai passé dans le laboratoire. Je le remercie également pour la relecture de mon manuscrit, de ses commentaires pertinents et des propositions faites pour l'améliorer.

Je tiens ensuite à remercier tous les membres du jury, Prof. Y. Perriard, Prof. H. Bleuler, Prof. A. Bouscayrol et Dr. G. Coquery pour leurs commentaires concernant le manuscrit, pour le temps consacré pour la lecture de ma thèse et pour avoir accepté de faire partie du jury de thèse.

Je souhaite remercier tous les partenaires industriels pour leur soutien technique, leurs conseils et la mise à disposition de matériel, notamment M. Froehlich, M. Klohner et M. Scholten de l'entreprise Bombardier Transportation, M. Altherr de l'entreprise Stadler Rail AG et M. Tanner de l'entreprise Oerlikon Batterie.

J'exprime toute ma gratitude à tous mes collègues du laboratoire et plus particulièrement au Dr. Philippe Barrade, premier assistant du laboratoire, pour son soutien, son aide, la relecture du manuscrit et les différentes discussions pertinentes concernant les sujets de ma thèse. Les différents résultats trouvés au cours de mon travail sont directement liés à la qualité du matériel informatique mis à disposition et géré par Ro-

berto Zoia. Je remercie également Yves Birbaum et Fabienne Vionnet pour la gestion efficace du matériel, pour les conseils lors de la réalisation de circuits, pour l'aide concernant toutes les tâches administratives et pour leur bonne humeur. Tous les autres membres du laboratoire m'ont permis de réaliser ma thèse dans de bonnes conditions et dans une atmosphère de travail agréable.

Je remercie tous les étudiants qui ont participé aux différents projets concernant mon travail de thèse et plus particulièrement Numa Uchimoto pour les différentes discussions concernant la réalisation du simulateur de réseaux.

Un grand merci à ma famille pour leur soutien tout au long de la réalisation de mon travail de thèse.

Mes derniers remerciements sont adressés à Sylvain Hauser pour ses contributions, son soutien, ses encouragements et ses explications avisées pour la conception de circuits ainsi qu'à Yannick Louvrier, collègue de bureau, pour toutes les discussions tant professionnelles qu'extra-professionnelles et son soutien très actif dans les différentes tâches liées à la réalisation d'une thèse.

Résumé

Avec le *XXI^e* siècle, le domaine des transports rencontre un certain nombre de problèmes, dont ceux de la raréfaction des ressources de pétrole et de la pollution de l'air. Depuis quelques dizaines d'années, des recherches sont faites dans ce domaine. Les véhicules de type hybride électrique ont un grand potentiel pour une solution à court terme. Ils conservent une source d'énergie conventionnelle, mais un stockeur d'énergie est ajouté à bord. Ainsi, l'autonomie du véhicule est assurée par la première source d'énergie et les contraintes en puissance instantanée élevée sont assurées par la seconde. En plus, le stockeur ajoute la possibilité de récupérer l'énergie de freinage de manière optimale.

Au cours de cette dernière décennie, un développement très important a été fait dans le domaine du stockage de l'énergie. Les supercondensateurs sont apparus. Ce sont des composants de puissance adaptés pour une application dans le domaine des transports : leur durée de vie est de plus de 500 000 cycles alors que leur densité en puissance (W/kg) est beaucoup plus élevée que celle des batteries.

Ce travail concerne les domaines de la pollution de l'air et du développement de nouveaux éléments stockeurs d'énergie. Il présente les propriétés liées à l'utilisation d'un système d'assistance en puissance pour véhicules. Dans ce cas, le stockeur d'énergie auxiliaire est embarqué et il est composé de supercondensateurs. Le gain sur la consommation énergétique du véhicule dépend directement de son type, du parcours et de la taille du stockeur d'énergie. Une méthode de dimensionnement optimale de la taille du stockeur d'énergie est développée.

Une application dans plusieurs catégories de véhicules est présen-

tée : un réseau de transport alimenté par caténaire, un véhicule diesel-électrique et un véhicule électrique léger. Pour tous ces cas, la taille du stockeur d'énergie, le système de gestion de l'énergie à bord et la baisse de consommation d'énergie primaire sont définis.

Suite aux différentes méthodes développées, il est possible de définir les conditions pour lesquelles un système d'assistance en puissance apporte un réel gain sur la consommation énergétique.

L'ajout d'un système de stockage d'énergie à bord d'un véhicule ne peut pas se faire sans l'ajout d'un convertisseur statique. Il est utilisé principalement pour adapter les niveaux de tension entre le stockeur et les autres équipements de propulsion du véhicule et pour assurer la gestion de l'énergie à bord. Un convertisseur continu-continu multicanaux entrelacés fonctionnant en mode de conduction discontinu est spécialement dédié aux applications mobiles. Le poids et le volume sont réduits par rapport à un convertisseur standard et le rendement est plus élevé.

Mots clés

Stockage d'énergie – Supercondensateur – Assistance en puissance – Véhicule – Réseau de transport – Consommation énergétique – Convertisseur DC/DC

Summary

So far in the Twenty-first century the field of people transportation has had numerous setbacks, of these some are related to air pollution and some to the rarefaction of petroleum sources. Studies have been undertaken within this domain for many years now. Hybrid vehicles in which the conventional energy source is kept and an on-board energy source is added are showing themselves to be a potentially good solution in the short term. In these hybrids the vehicle autonomy is assumed by the first energy source and the power constraints are taken upon by the second. Moreover, the storage element adds the possibility to recuperate the braking energy in an optimal way.

During the last decade, an important development has come about in the field of energy storage elements. The supercapacitors newly appearing on the scene are power components well suited for an application in transportation domain: their lifetime is over 500,000 cycles and their power density (W/kg) is much higher than for batteries.

The present work is concerned with air pollution and energy storage elements and presents the details of using a power assistance system for vehicles. In this case, the auxiliary power energy storage element is on board and is made of supercapacitors. The decreased energy consumption of the vehicle is directly dependant on the vehicle's type, the route driven and the size of the storage element within the vehicle. An optimal method of sizing the energy storage element is developed.

An application of the principles is presented in three different categories of vehicle: a transportation network fed by catenaries, a diesel-electric vehicle and a light electrical vehicle. In all three cases, the size

of the storage elements, the on-board energy control system and the reduction of the vehicle consumption are defined.

Following the different methods developed here, it is possible to define the conditions for when a power assistance system can give a real decrease in the vehicle's energy consumption.

When an on-board storage element is added in a vehicle, a static converter has to be used. Its main role is to adapt the voltage level between the storage element and the other vehicle propulsion equipment and to control the energy flow on board the vehicle. An interleaved multi-channel continuous-continuous converter operating in a discontinuous conduction mode is especially dedicated to mobile applications. This type of converter is lighter and smaller in volume, yet its efficiency is greater.

Key words

Energy storage – Supercapacitor – Power assistance – Vehicle – Transport network – Energy consumption – DC/DC converter

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Summary	v
Notations	xiii
1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Motivations et objectifs de la thèse	5
1.3 Structure de ce document	6
2 Les véhicules, augmentation de leur rendement	9
2.1 Introduction	9
2.2 Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques	10
2.2.1 Véhicules standards à moteur thermique	11
2.2.2 Véhicules électriques	12
2.2.3 Véhicules dont la source d'énergie est un volant d'inertie	13
	vii

2.2.4	Véhicules dont la source d'énergie est de l'air comprimé	14
2.2.5	Véhicules dont la source d'énergie est une pile à combustible	15
2.2.6	Véhicules hybrides	16
2.3	Concept de l'assistance en puissance pour véhicules . . .	20
2.3.1	Contraintes en puissance sur un parcours	21
2.3.2	Système optimal d'assistance en puissance	26
2.3.3	Gain sur le rendement énergétique en fonction de la longueur du parcours et du poids à vide du véhicule	28
2.4	Conclusion	32
3	Les différents types d'accumulateurs d'énergie	35
3.1	Introduction	35
3.2	Types d'accumulateurs d'énergie pour les véhicules . . .	36
3.2.1	Accumulateurs d'énergie de type mécanique . . .	36
3.2.2	Accumulateurs d'énergie de type électrique . . .	43
3.3	Comparaison des différents types de stockeurs	50
3.3.1	Durée de vie et rendement du stockeur	50
3.3.2	Diagramme de Ragone	51
3.3.3	Plan de Ragone	54
3.4	Conclusion	55
4	Un réseau de transport alimenté par caténaire	57
4.1	Introduction	57
4.2	Définition d'un parcours de référence	60
4.3	Caractéristiques du véhicule de référence	63
4.4	Système d'assistance en puissance proposé	65
4.4.1	Structure du branchement du stockeur d'énergie dans le véhicule	68
4.4.2	Régulation du système d'assistance en puissance	71
4.5	Simulateur de réseau de transport à caténaire	72
4.5.1	Structure du simulateur	73
4.5.2	Modèles mécaniques du véhicule	74
4.5.3	Modèles électriques	81
4.5.4	Modèles du réseau d'alimentation, couplage entre les véhicules	82

4.5.5	Modèle des sous-stations	84
4.5.6	Noeud bilan	85
4.5.7	Boucle de calcul dans Simulink	86
4.5.8	Méthode de calcul retenue pour déterminer la tension de ligne	87
4.6	Paramètres du véhicule et de la ligne utilisés pour les simulations	90
4.7	Résultats pour un véhicule avec et sans stockeur	91
4.8	Résultats pour un réseau de véhicules standards	94
4.8.1	1 véhicule sur le parcours	94
4.8.2	1 véhicule toutes les 5 minutes sur le parcours . .	97
4.9	Résultats pour un réseau de véhicules avec un stockeur d'énergie	99
4.9.1	1 véhicule sur le parcours	100
4.9.2	1 véhicule toutes les 5 minutes sur le parcours . .	102
4.10	Consommation énergétique du réseau de transport . . .	104
4.10.1	Un seul véhicule sur la ligne	105
4.10.2	Un véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne . .	107
4.10.3	Pourcentage de véhicules avec un stockeur embarqué dans le réseau de transport	108
4.10.4	Variation du poids à vide des véhicules	109
4.10.5	Variation de la puissance des auxiliaires	110
4.10.6	Variation de la résistance linéique de la ligne . .	112
4.11	Conclusion	114
5	Un véhicule diesel-électrique	117
5.1	Introduction	117
5.2	Définition d'un parcours de référence	119
5.3	Caractéristiques du véhicule	123
5.4	Mesure des puissances	126
5.5	Système d'assistance en puissance	128
5.5.1	Structure du branchement du stockeur d'énergie dans le véhicule	130
5.5.2	Régulation du système d'assistance en puissance	132
5.6	Dimensionnement du banc de supercondensateurs	136
5.6.1	Modification des contraintes sur le moteur diesel	136
5.6.2	Recherche de la taille du stockeur en fonction de la taille du moteur diesel	141

5.6.3	Résultats du dimensionnement	143
5.7	Simulations sur le parcours type	149
5.7.1	Descriptif du simulateur	149
5.7.2	Résultats obtenus pour le cas du moteur diesel de 380 kW	150
5.7.3	Résumé des résultats obtenus pour les autres cas de moteurs diesel	153
5.8	Considérations économiques	155
5.8.1	Considérations économiques pour la fabrication du véhicule	155
5.8.2	Considérations économiques pour l'exploitation du véhicule	158
5.8.3	Considérations économiques globales	160
5.9	Conclusion	162
6	Un véhicule électrique léger	165
6.1	Introduction	165
6.2	Définition du véhicule de référence	167
6.3	Mesures effectuées sur le parcours de référence	170
6.4	Le système d'assistance en puissance pour un véhicule électrique	176
6.5	Dimensionnement du stockeur d'énergie additionnel	178
6.5.1	Détermination de l'énergie et de la puissance pour le stockeur d'énergie additionnel	179
6.5.2	Modèle de supercondensateurs retenu	181
6.5.3	Détermination du nombre de supercondensateurs nécessaire	181
6.5.4	Détermination de la structure du banc de super- condensateurs	182
6.5.5	Changement du type de batteries	184
6.6	Régulation pour la gestion énergétique dans le véhicule	185
6.7	Simulations du véhicule avec un système d'assistance en puissance	186
6.8	Conclusion	192
7	Convertisseur statique associé au stockeur d'énergie	195
7.1	Introduction	195
7.2	Principe du convertisseur DC/DC multicanal entrelacé	196

7.2.1	Mise en parallèle de plusieurs convertisseurs élémentaires	197
7.2.2	Entrelacement de chaque canal	198
7.2.3	Utilisation du mode de conduction discontinue	199
7.2.4	Conduction inverse des transistors MOS	203
7.3	Cahier des charges pour la réalisation du convertisseur	204
7.4	Stratégie de commande pour le convertisseur multicanal	205
7.4.1	Réalisation des signaux de commande	205
7.4.2	Régulateurs pour le convertisseur complet	207
7.5	Détermination du nombre de canaux	210
7.6	Résultats des simulations	217
7.7	Résultats expérimentaux	223
7.8	Conclusion	230
8	Conclusion générale	233
8.1	Résumé	234
8.2	Résultats	236
8.3	Perspectives	239
A	Relations pour un convertisseur DC/DC multicanal	241
A.1	Relations pour un convertisseur de type abaisseur	241
A.2	Relations pour un convertisseur de type élévateur	246
B	Interfaces graphiques pour le simulateur de réseau	253
B.1	Interface pour l'introduction des paramètres	254
B.2	Interface pour l'affichage des résultats	255
C	Consommation d'un réseau de véhicules	257
C.1	Variation de la proportion de véhicules avec un stockeur	258
C.2	Variation du poids à vide des véhicules	259
C.3	Variation de la puissance des auxiliaires	260
C.4	Variation de la résistance linéique de ligne	261
	Table des figures	263
	Liste des tableaux	271
	Bibliographie	273

Curriculum Vitae	281
------------------	-----

Notations

Abréviations

<i>DOD</i>	Depth of Discharge (Profondeur de décharge)
<i>EPFL</i>	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
<i>FS</i>	Chemins de fer italiens
<i>G</i>	Générateur
<i>GTW</i>	Gelenktriebwagen (Automotrice articulée)
<i>K1, 2</i>	Interrupteurs dans une cellule de commutation
<i>LEI</i>	Laboratoire d'Electronique Industrielle
<i>M</i>	Moteur
<i>MG</i>	Moteur-Générateur
<i>PSI</i>	Paul Scherrer Institut
<i>PWM</i>	Pulse width modulation
<i>SMES</i>	Superconducting Magnetic Energy Storage
<i>Ssta</i>	Sous-station
<i>Scap</i>	Supercondensateur
<i>TR</i>	Transistor
<i>Vhc</i>	Véhicule

Symboles

<i>a</i>	Accélération	$[m/s^2]$
----------	--------------	-----------

A_f	Constante proportionnelle au carré de la vitesse (Force de frottements aérodynamiques)	$[N \cdot s^2 \cdot m^{-2}]$
A_{sc}	Constante proportionnelle au carré de la vitesse (Régulation de la puissance du banc de scap)	$[N \cdot s^3 \cdot m^{-2}]$
B	Effort de freinage électrique	$[N]$
b_e	Consommation spécifique	$[g/kWh]$
B_f	Constante proportionnelle à la vitesse (Force de frottements aérodynamiques)	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$
B_{sc}	Constante proportionnelle à la vitesse (Régulation de la puissance du banc de scap)	$[N \cdot s^2 \cdot m^{-1}]$
C	Condensateur	$[F]$
C'	Capacité linéique	$[As/Vm]$
C_f	Constante (Force de frottements aérodynamiques)	$[N]$
C_s	Condensateur de sortie d'un convertisseur	$[F]$
C_{sc}	Constante (Régulation de la puissance du banc de scap)	$[N \cdot s]$
C_{scap}	Condensateur équivalent à un banc de scap	$[F]$
D	Rapport cyclique	$[-]$
E	Energie	$[J]$
e	Energie (grandeur relative)	$[-]$
E_a	Energie pour accélérer un véhicule	$[J]$
E_b	Energie stockée dans une batterie	$[J]$
e_b	Energie stockée dans une batterie (grandeur relative)	$[-]$
E_c	Energie cinétique de rotation	$[J]$
E_{cap}	Energie stockée dans un condensateur	$[J]$
e_{cap}	Energie stockée dans un condensateur (grandeur relative)	$[-]$
E_f	Energie pour vaincre les forces de frottement	$[J]$
E_i	Energie stockée dans un SMES	$[J]$
e_i	Energie stockée dans un SMES (grandeur relative)	$[-]$
E_{pertes}	Energie dissipée	$[J]$

E_{sc}	Energie stockée sur le banc de supercondensateurs	[J]
F	Force	[N]
F_a	Force d'arrachement	[N]
F_c	Force due aux courbes	[N]
$f_{c_{tot}}$	Fréquence des oscillations du courant total	[Hz]
F_d	Force due à la déclivité	[N]
F_{ex}	Force due à l'environnement extérieur du véhicule	[N]
F_f	Force de frottement due à l'air	[N]
F_g	Force due au passage dans un tunnel	[N]
F_{in}	Force produite par le véhicule	[N]
f_p	Fréquence de pulsation	[Hz]
G'	Conductance linéique	[A/Vm]
g	Constante de gravitation	[m/s ²]
I	Courant	[A]
i	Déclivité	[‰]
I_0	Courant nominal	[A]
I_{bat}	Courant batterie	[A]
I_{bat_c}	Consigne du courant batterie	[A]
I_{Δ}	Moment d'inertie	[kg · m ²]
I_e	Courant d'entrée d'un convertisseur	[A]
$I_{k1,2}$	Courant traversant un interrupteur	[A]
I_L	Courant dans une inductance	[A]
I'_l	Matrice des courants de ligne (ordonnée dans l'ordre croissant des Z)	[A]
I_{max}	Courant maximal	[A]
I'_n	Matrice des courants de noeud (ordonnée dans l'ordre croissant des Z)	[A]
I_{NB}	Courant du noeud bilan	[A]
I_{sc_c}	Consigne de courant (banc de scap)	[A]
k_e	Coefficient pour la force dans les courbes	[m]
k_g	Rapport de transmission	[—]
k_t	Coefficient pour la force dans un tunnel	[—]
L	Inductance	[H]
L'	Inductance linéique	[Vs/Am]

L_f	Inductance équivalente pour une sous-station	[H]
m	Masse	[kg]
m^*	Masse corrigée d'un véhicule	[kg]
m_e	Masse embarquée dans le véhicule	[kg]
M_e	Couple (essieu)	[N · m]
M_{gen}	Couple (génératrice)	[N · m]
M_{gen_c}	Consigne de couple (génératrice)	[N · m]
M_m	Couple (moteur)	[N · m]
M_{th}	Couple (moteur thermique)	[N · m]
M_{th_c}	Consigne de couple (moteur thermique)	[N · m]
N_{can}	Nombre de canaux	[-]
P	Puissance active	[W]
p	Puissance active (grandeur relative)	[-]
P_{aux}	Puissance des auxiliaires	[W]
P_{brs}	Puissance dissipée (véhicule)	[W]
P_{con}	Puissance transitant dans un convertisseur	[W]
P_{mo}	Puissance du moteur	[W]
P_n	Matrice des puissances	[W]
P'_n	Matrice des puissances (ordonnée dans l'ordre croissant des Z)	[W]
P_{ol}	Puissance à la caténaire (véhicule)	[W]
P_{sc}	Puissance du banc de supercondensateurs	[W]
P_{sub}	Puissance de la sous-station	[W]
P_{tr}	Puissance totale pour la traction	[W]
P_{vhc}	Puissance du véhicule	[W]
P_{zk}	Puissance électrique totale du véhicule (bus DC)	[W]
Q	Charge stockée	[C]
Q_0	Charge nominale	[C]
R	Résistance	[Ω]
R'	Résistance linéique	[Ω/m]
R_b	Résistance de fuite	[Ω]
R_c	Résistance de connexion (noeud bilan - début ligne)	[Ω]
R_{con}	Résistance de connexion	[Ω]
R_{dson}	Résistance de passage d'un transistor	[Ω]

R_e	Rayon de la roue	$[m]$
R_{eq}	Résistance équivalente entre 2 points du réseau	$[\Omega]$
$R_{eq,lin}$	Résistance linéique équivalente	$[\Omega/m]$
R_{ind}	Résistance série d'une inductance	$[\Omega]$
R_{int}	Résistance interne d'une sous-station	$[\Omega]$
R_L	Résistance de bypass	$[\Omega]$
R_L	Matrice des résistances de ligne	$[\Omega]$
R'_L	Matrice des résistances de ligne (ordonnée dans l'ordre croissant des Z)	$[\Omega]$
$R_{l1,2}$	Résistance de la ligne entre 2 points d'équilibrage	$[\Omega]$
R_{nb}	Résistance parasite du noeud bilan	$[\Omega]$
$R_{r1,2}$	Résistance du rail entre 2 points d'équilibrage	$[\Omega]$
R_s	Résistance de connexion (ssta noeud bilan - début ligne)	$[\Omega]$
R_s	Résistance de charge d'un convertisseur	$[\Omega]$
R_v	Rayon de courbure	$[m]$
t	Temps	$[s]$
T_a	Temps d'accélération d'un véhicule	$[s]$
T_e	Temps d'enclenchement	$[s]$
T_d	Temps de déclenchement	$[s]$
T_{off}	Temps de blocage d'un transistor	$[s]$
T_p	Période de pulsation	$[s]$
$t_{s_{rch}}$	Temps pour recharger le banc de supercondensateurs lors d'un arrêt	$[s]$
U	Tension	$[V]$
U_0	Tension à vide d'une sous-station	$[V]$
U_0	Tension nominale	$[V]$
U_{bat}	Tension d'une batterie	$[V]$
U_c	Tension du bus continu	$[V]$
U_{c_c}	Consigne de la tension du bus continu	$[V]$
U_e	Tension à l'entrée d'un convertisseur	$[V]$
$U_{k1,2}$	Tension aux bornes d'un interrupteur	$[V]$
U_n	Matrice des tensions de noeud	$[V]$

U'_n	Matrice des tensions de noeud (ordonnée dans l'ordre croissant des Z)	[V]
U_{nb0}	Tension à vide du noeud bilan	[V]
U_{NB}	Tension du noeud bilan	[V]
U_s	Tension à la sortie d'un convertisseur	[V]
U_{sc}	Tension d'un banc de supercondensateurs	[V]
$U_{sc_{max}}$	Tension maximale d'un banc de supercondensateurs	[V]
v	Vitesse	[m/s]
V	Vitesse	[km/h]
v_{max}	Vitesse maximale	[m/s]
z	Position par rapport au début de la ligne	[m]
Z	Effort de traction	[N]
Z_n	Matrice des positions	[m]
Z'_n	Matrice des positions (ordonnée dans l'ordre croissant des Z)	[m]
z_{sub}	Position de la sous-station	[m]
z_{vhc}	Position du véhicule	[m]
α	Angle entre la voie et l'horizontale	[rad]
α	Coefficient du temps d'annulation du courant par rapport à T_p	[—]
ΔI_L	Ondulation de courant dans une inductance	[A]
ω	Vitesse angulaire	[rad/s ⁻¹]
ω_e	Vitesse angulaire (essieu)	[rad/s ⁻¹]
ω_{groupe}	Vitesse angulaire (groupe moteur diesel-génératrice)	[rad/s ⁻¹]
ω_m	Vitesse angulaire (moteur)	[rad/s ⁻¹]
ζ	Coefficient pour calculer la masse corrigée d'un véhicule	[—]

Chapitre 1

Introduction

1.1 Introduction

La problématique de l’approvisionnement en énergie primaire et des rejets polluants liés à l’utilisation de véhicules est étudiée depuis plus de trente ans. Durant cette période, les progrès faits sur le rendement des moteurs utilisés dans les véhicules ont été importants. Parallèlement, de nouvelles prescriptions concernant les gaz d’échappement des véhicules sont entrées en vigueur et ont eu pour effet de réduire de manière importante les émissions de polluants [1]. Cette diminution a été principalement liée à l’obligation d’équiper les véhicules de catalyseurs. La figure 1.1 présente l’évolution et les prévisions des émissions entre 1980 et 2030 en Suisse.

Durant cette même période, le développement d’éléments de confort et de sécurité (augmentation du poids à vide) [2] ainsi que l’augmentation des performances dynamiques ont fait que, bien que les rejets polluants ont été réduits, la consommation de carburant des véhicules

1.1. Introduction

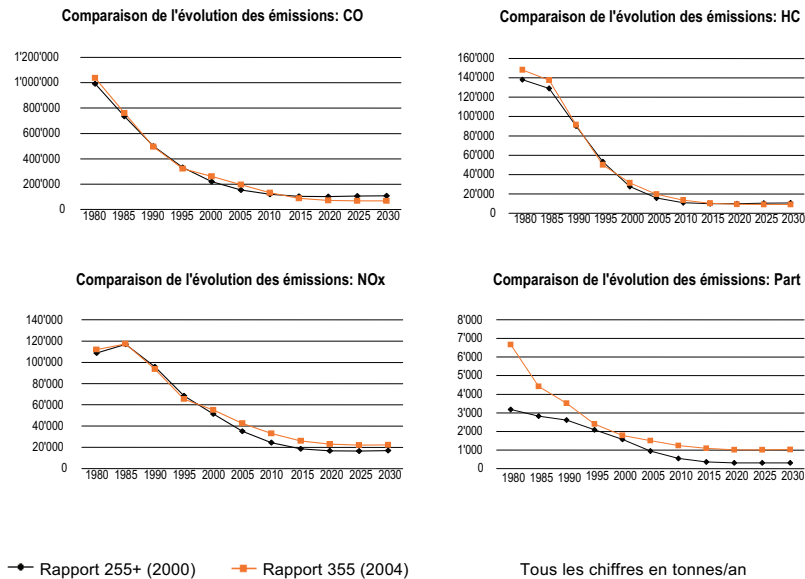


FIG. 1.1 – Comparaison entre l'évolution actualisée des émissions ("Rapport 355") et les résultats de l'ancien rapport OFEFP 255/Compléments, OFEFP 2000. Source : [1]

n'a que faiblement diminué. Un de ces éléments de confort concerne l'ajout d'une climatisation embarquée [3].

Actuellement, la grande majorité des véhicules utilisent des carburants de type pétroliers (95 % au niveau mondial en 2000) [4]). Cette source d'énergie primaire n'est pas renouvelable et donc va disparaître dans le futur. L'échéance pour l'épuisement des ressources est différente en fonction de chaque étude.

Parallèlement à l'amélioration du rendement des moteurs, l'évolution dans le domaine des composants qui peuvent être utilisés pour stocker de l'énergie a été importante durant ces dix dernières années. Ainsi, par exemple, les supercondensateurs [5], [6], les volants d'inertie [7] et de nouveaux types de batteries [8], [9] ont été développés.

En relation avec le développement plus récent des supercondensateurs, ce travail sera orienté fortement sur les performances qu'il est

possible d'atteindre au sens de leur densité d'énergie et de puissance. Une utilisation industrielle devra traiter en détail les aspects du cycle de vie de ces composants qui font encore défaut actuellement. De plus, les aspects économiques et de sécurité lors de leur utilisation devront également être abordés en plus des aspects purement énergétiques.

La puissance nécessaire pour un véhicule sur une phase accélération-freinage type est donnée dans la figure 1.2. Dans ce cas, la vitesse maximale du véhicule est de 70 km/h , son accélération est constante (1.2 m/s^2) et le parcours a un dénivelé nul. Cette caractéristique se retrouve pour tous les types de véhicules. Trois phases distinctes apparaissent :

- Accélération. La puissance croît en fonction de l'augmentation de la vitesse.
- Parcours à vitesse constante. La puissance nécessaire est alors constante et est faible par rapport à la puissance de pointe lors des accélérations. Elle sert à compenser les pertes aérodynamiques du véhicule.

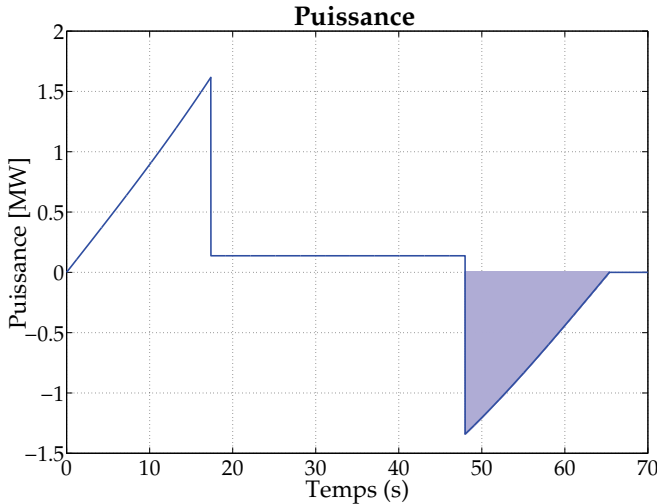


FIG. 1.2 – Puissance type pour une phase accélération freinage

- Freinage. La puissance est dans ce cas négative et décroît en fonction de la baisse de la vitesse.

Dans un véhicule standard sans stockeur d'énergie, toute la puissance de freinage est dissipée sous forme de chaleur, ce qui a un impact direct sur le rendement énergétique du véhicule. L'énergie de freinage dissipée est représentée par la surface bleue dans la figure 1.2. Dans certains cas, cette énergie peut représenter jusqu'à 78 % (voir section 2.3.1) de l'énergie qui est fournie aux roues lors des phases d'accélération et d'avance à vitesse constante. Cependant, dans une réalisation pratique, la totalité de cette énergie ne peut pas être valorisée à cause du rendement non unitaire de la chaîne mécanique et électrique de traction et du stockeur d'énergie. L'exemple d'un train de type diesel-électrique sans stockeur d'énergie embarqué est présenté dans le chapitre 5 de ce mémoire.

La solution proposée dans cette thèse pour augmenter le rendement énergétique des véhicules est d'ajouter un stockeur d'énergie embarqué dans le but de pouvoir récupérer l'énergie de freinage et de la réinjecter dans le système de traction lors des accélérations. Ainsi, la source d'énergie standard est utilisée pour fournir la puissance moyenne et le stockeur pour absorber les contraintes en puissance. Du fait que le moteur standard ne doit plus être dimensionné pour fournir les pointes de puissance lors des accélérations, il est possible d'utiliser un moteur de plus faible taille qui, de plus, peut être exploité des des conditions d'utilisation proches de son point de fonctionnement à meilleur rendement. Ce concept est appelé "downsizing" [10]. Les supercondensateurs ou les volants d'inertie sont des composants ayant les propriétés requises pour assurer la fonction de tampon d'énergie dans ce type de systèmes [11], [12].

La connexion entre un système de stockage d'énergie de type supercapacitif et le reste du véhicule s'effectue au travers d'un convertisseur statique. Dans la grande majorité des cas, ce convertisseur doit être de type DC/DC dans le but d'adapter la tension continue variable à la tension utilisée dans le véhicule. Dans le domaine des transports, le poids est un critère déterminant pour le rendement global et le volume pour le nombre de personnes pouvant être embarquées. De plus, pour exploiter de manière efficace l'énergie de freinage récupérée, le rendement du convertisseur est également un facteur important. Une topologie standard de convertisseur DC/DC peut être utilisée [13], mais le poids et

le volume des composants passifs associés peuvent s'avérer problématiques. Une solution possible est d'utiliser un convertisseur de type multicanaux entrelacés et fonctionnant en mode de conduction discontinu. Le rendement, le poids et le volume de ce type de convertisseur sont alors plus facilement compatibles avec les contraintes dues à un système d'assistance en puissance.

Le gain sur la consommation d'énergie primaire par l'ajout d'un système d'assistance en puissance est directement dépendant du type de véhicule, du parcours, et des propriétés dynamiques requises. Ainsi, les paramètres du poids à vide, de la valeur de l'accélération, de la vitesse maximale, de la longueur du parcours entre deux arrêts, de la déclivité, etc doivent être étudiés en détail pour déterminer la taille optimale du stockeur d'énergie à utiliser.

1.2 Motivations et objectifs de la thèse

Les véhicules de type hybride existent depuis longtemps ([14] et [15]). Certains modèles sont actuellement sur le marché. Un exemple de véhicule hybride est la Toyota Prius ([16] et [2]). Toutefois, le gain sur la consommation de ce type de véhicule est dépendant de nombreux paramètres, dont :

- Poids du véhicule
- Accélération
- Durée de l'accélération (et donc de la vitesse maximale)
- Pente du parcours

En plus des paramètres concernant le véhicule et le type de parcours, le rendement énergétique est également directement lié à la structure du véhicule hybride, au type de stockeur d'énergie et aux convertisseurs statiques utilisés pour la gestion de l'énergie à bord du véhicule.

Le travail présenté dans cette thèse consiste à caractériser et à dimensionner un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué pour différents types de véhicules. Ce système est utilisé dans le but de lisser la puissance délivrée par le moteur principal et de récupérer l'énergie de freinage. Les composants suivants seront détaillés :

- Structure et gestion des deux sources d'énergie embarquées

- Choix et dimensionnement du stockeur d'énergie
- “Downsizing” de la source d'énergie primaire
- Détermination de la structure d'un convertisseur statique adapté

Le premier but consiste à déterminer quels sont les critères pour qu'un système d'assistance en puissance permette de diminuer de manière significative la consommation énergétique d'un véhicule tout en conservant les mêmes caractéristiques dynamiques telles que l'accélération et la vitesse maximale.

Le second but est de présenter une étude complète concernant le système d'assistance en puissance pour trois catégories distinctes de véhicules. La première concerne un réseau de transport urbain (trams) alimenté par caténaire. A cause des interactions entre les différents véhicules sur le réseau, la consommation énergétique est déterminée pour le système complet incluant les sous-stations, les caténaires et les véhicules. La seconde catégorie concerne les véhicules de type diesel-électrique. Le cas d'une automotrice articulée circulant en région montagneuse est choisi. La troisième est caractérisée par un véhicule électrique léger. Un scooter électrique circulant en milieu urbain est étudié.

Dans tous les cas présentés, un convertisseur statique de type DC/DC doit être ajouté au système. La caractérisation, le dimensionnement et la réalisation d'un convertisseur dédié aux systèmes d'assistance en puissance embarqués est le troisième but de ce travail.

1.3 Structure de ce document

Le chapitre 2 de la thèse présente les différentes solutions pour augmenter le rendement énergétique des véhicules. La meilleure solution est d'utiliser des véhicules de type hybride. Une comparaison entre les différentes structures est présentée dans ce chapitre. Les critères de poids - volume - rendement - réalisation mécanique y sont abordés. La dernière partie du chapitre 2 présente la consommation énergétique d'un véhicule en fonction des critères de poids, de résistance aérodynamique, de pente, de distance entre les arrêts. En fonction de ces mêmes critères, le gain sur la consommation énergétique par l'ajout d'un système d'assistance en puissance est étudié.

Le chapitre 3 présente les différents types de stockeurs d'énergie qu'il

est possible d'utiliser pour les véhicules hybrides. Une comparaison basée sur des critères densité de puissance - densité d'énergie - rendement - poids - volume entre les différentes solutions est présentée dans ce chapitre.

Les trois chapitres suivants vont analyser un système d'assistance en puissance pour trois types de véhicules différents :

- Véhicules intégrés dans un réseau de transport urbain à base de caténaires
- Véhicule dont la source d'énergie primaire dépend d'un combustible fossile
- Véhicule électrique léger à base de batteries

Le chapitre 4 présente un système d'assistance en puissance pour des véhicules dans un réseau de transport à base de caténaires. Les véhicules modernes qui sont exploités dans ce type de réseau réinjectent l'énergie de freinage dans la caténaire. Toutefois, les conditions pour réinjecter cette énergie sont très strictes et dépendent directement des autres véhicules sur la ligne. Dans ce cas, un stockeur d'énergie est ajouté à bord du véhicule dans le but de récupérer l'énergie de freinage de manière efficace et de diminuer les contraintes en puissance sur la caténaire. Un logiciel de simulation est développé dans ce contexte permettant de montrer les interactions entre les véhicules ainsi que de déterminer le rendement énergétique global du système complet (véhicules, infrastructure de distribution de l'énergie, sous-stations). Une application sur un réseau de tram est présentée dans ce chapitre.

Le chapitre 5 présente le concept d'assistance en puissance appliqué à un véhicule dont la source d'énergie primaire est composée d'un moteur thermique conventionnel. Dans ce type de véhicules, toute l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur et le moteur thermique ne fonctionne pas dans sa plage de meilleur rendement (couplage sans stockage entre le moteur thermique et les roues). Le système d'assistance en puissance proposé consiste à ajouter un stockeur d'énergie embarqué dans le but d'augmenter le rendement énergétique du véhicule par récupération de l'énergie de freinage et par découplage de la puissance du moteur thermique de la puissance de propulsion. L'exemple retenu dans ce chapitre est une automotrice articulée de type diesel-électrique.

Le chapitre 6 traite du système d'assistance en puissance pour un

véhicule électrique léger à base de batteries. Dans ce cas, l'énergie de freinage ne peut que partiellement être récupérée à cause du faible courant de charge pouvant être injecté dans les batteries. Une autre source de pertes dans ce système est due à l'énergie dissipée dans la résistance interne des batteries. Lors des accélérations, les pertes atteignent jusqu'à 33 % de l'énergie de traction. Le système d'assistance en puissance propose d'ajouter un stockeur d'énergie embarqué ayant de meilleures caractéristiques concernant les contraintes en puissance. Ainsi, les batteries sont conservées pour garantir l'autonomie et le stockeur additionnel d'énergie fournit les contraintes en puissance. L'exemple d'application retenu pour ce chapitre est un scooter électrique.

Le chapitre 7 est consacré aux systèmes d'électronique de puissance, et plus particulièrement aux convertisseurs statiques. Dans tous les systèmes d'assistance proposés dans les chapitres précédents, un stockeur d'énergie est ajouté à bord du véhicule. Ce dernier doit être interfacé à l'aide d'un convertisseur statique au reste du véhicule. Ce stockeur est également utilisé pour gérer les flux énergétiques à bord du véhicule. Du fait que le convertisseur est embarqué, le poids et le volume sont deux critères très importants. Le rendement doit également être élevé. Un convertisseur standard peut être utilisé à bord, mais le poids des éléments passifs peut s'avérer problématique. Une solution particulièrement intéressante est présentée dans ce chapitre et propose un convertisseur statique regroupant toutes les caractéristiques requises pour une application mobile. Il s'agit d'un convertisseur continu-continu multicanaux entrelacés fonctionnant en régime de conduction discontinue.

Le chapitre 8 est écrit comme conclusion générale de cette thèse. Il résume les différentes solutions abordées dans ce document et donne les perspectives pour la réalisation de véhicules hybrides dans le futur.

Chapitre 2

Les véhicules, augmentation de leur rendement

2.1 Introduction

La réduction de la consommation énergétique et la baisse des rejets polluants dans le domaine des transports est un des défis majeurs de ce siècle. Ceci est dû principalement à la forte croissance durant ces dernières décennies des besoins en transports [17] [18]. La première partie de ce chapitre présente les différentes solutions qui sont envisagées dans ces domaines.

L'utilisation de véhicules hybrides présente un important potentiel pour diminuer la consommation énergétique. Les différents types de véhicules hybrides ainsi que leurs avantages et inconvénients sont exposés dans ce chapitre. La solution retenue dans ce travail est d'utiliser un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué dans le véhicule.

La dernière section de ce chapitre présente la méthode de dimensionnement optimale d'un système d'assistance en puissance en fonction des

paramètres du véhicule et du parcours. La fin de ce chapitre montre le potentiel d'augmentation du rendement énergétique d'un véhicule en fonction du type du véhicule et du parcours (vitesse maximale, longueur du parcours,...).

2.2 Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

Différentes approches peuvent être suivies pour diminuer les rejets polluants dus aux véhicules et pour augmenter leur rendement énergétique. Les solutions offrant le plus grand potentiel sont :

1. Réduction de la masse à vide des véhicules
2. Augmentation du rendement énergétique des moteurs à combustion
3. Changement du vecteur d'énergie dans le véhicule
4. Amélioration de la gestion énergétique à bord du véhicule

1. La première solution consiste à diminuer le poids à vide du véhicule. Lors de chaque accélération, l'énergie cinétique du véhicule est proportionnelle au carré de la vitesse et à la masse du véhicule. Lors du freinage avec un véhicule standard, toute cette énergie est dissipée sous forme de chaleur. Par exemple, l'utilisation d'aluminium ([19]) permet de réduire le poids à vide.

2. La seconde solution est seulement valable pour les véhicules utilisant un moteur à combustion et elle consiste à augmenter le rendement du moteur à explosion ou du système de traitement des gaz d'échappement.

3. Le remplacement d'un moteur à combustion par une autre source d'énergie permet de réduire les émissions de gaz polluants. Il est par exemple possible d'utiliser des batteries, des volants d'inertie, de l'air comprimé, de l'hydrogène,... pour stocker l'énergie nécessaire à la traction. Dans tous ces cas, le procédé utilisé pour produire l'énergie pour la recharge doit être pris en compte lors du calcul du rendement global.

2.2. Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

Dans bien des cas, cette production est associée à une libération de CO_2 dans l'atmosphère.

4. La dernière solution concerne l'amélioration de la gestion énergétique à bord du véhicule. Il est par exemple possible d'utiliser un véhicule hybride permettant de récupérer l'énergie de freinage de manière optimale et de la réinjecter dans le système de traction lors de l'accélération suivante. Toutefois, l'ajout d'un stockeur d'énergie embarqué dans le véhicule augmente la masse à vide du véhicule. La réduction de consommation qu'il est possible d'obtenir avec un tel système est directement liée au type de véhicule et au parcours.

2.2.1 Véhicules standards à moteur thermique

Actuellement, 95% des transports sont réalisés par des véhicules entraînés par un moteur à combustion [4]. La figure 2.1 montre le schéma structurel d'un véhicule de ce type. Dans ce cas, des produits dérivés du pétrole constituent la source d'énergie. L'énergie mécanique de rotation produite par le moteur à combustion est transférée aux roues au travers d'une transmission mécanique. Avec cette configuration, toute l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur. Le rendement énergétique lors d'un parcours constitué de plusieurs phases d'accélération et de freinage est faible. Il est montré dans la suite de ce chapitre que l'énergie dissipée lors des freinages peut atteindre 80 % de l'énergie produite par le moteur thermique.

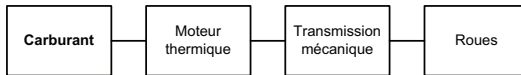


FIG. 2.1 – Structure d'un véhicule à moteur thermique

La combustion dans ce type de moteurs libère dans l'atmosphère du dioxyde de carbone, des monoxydes de carbone, des particules fines, des oxydes d'azote, des oxydes de soufre et quelques hydrocarbures imbrûlés. En plus de ces désavantages, les réserves de pétrole ne sont pas infinies et ainsi, en fonction de la diminution des réserves, le prix du pétrole va augmenter de manière significative. Pour ces différentes raisons, de nouvelles solutions moins gourmandes en énergie primaire ou utilisant

2.2. Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

une autre source d'énergie sont en cours d'étude.

Dans ce travail, seules les solutions suivantes pour réduire la consommation et l'impact sur l'environnement des véhicules sont présentées : les véhicules électriques (stockage de l'énergie dans des batteries), les véhicules entraînés par un volant d'inertie, les véhicules dont la source d'énergie est de l'air comprimé, les véhicules dont la source d'énergie est une pile à combustible et les véhicules hybrides. La catégorie des véhicules hybrides inclut les systèmes d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué.

2.2.2 Véhicules électriques

La figure 2.2 présente le schéma bloc d'un véhicule électrique typique. Dans ce cas, la seule source d'énergie à bord est composée de batteries qui sont rechargées généralement durant la nuit.

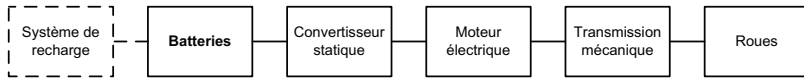


FIG. 2.2 – Véhicule électrique standard

Le point faible dans ce type de véhicule concerne les batteries. En effet, leur densité en puissance (W/kg) est limitée et leur durée de vie est directement liée aux contraintes qui leur sont appliquées. Ainsi, leur courant de charge et de décharge doit être limité pour garantir une durée de vie compatible avec un véhicule. Concernant la charge des batteries, la solution consiste à utiliser un faible courant durant une longue période (plusieurs heures ou pendant la nuit). Une limitation du courant de décharge est synonyme d'une diminution des performances dynamiques du véhicule, ce qui n'est pas envisageable. Le courant prélevé sur les batteries lors d'une accélération (contrainte en puissance élevée) reste donc important. Dans de nombreux cas dans le domaine des transports, les batteries doivent être dimensionnées selon un critère en puissance (lié à la durée de vie) et non selon un critère en énergie.

Dans un véhicule électrique, l'énergie de freinage peut être théoriquement récupérée. Dans ce cas, le moteur électrique fonctionne en générateur et réinjecte dans les batteries l'énergie cinétique du véhicule

2.2. Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

transformée en énergie électrique. Pour les batteries de type standard, leur courant maximal de charge est plus faible que leur courant maximal de décharge. La puissance de freinage qui peut être récupérée est directement liée au courant maximal de recharge de l'élément stockeur d'énergie.

Le véhicule électrique est “propre” au niveau de l'utilisateur final, c'est-à-dire qu'il n'émet pas de gaz polluants localement. Toutefois, il n'est pas toujours exempt d'impacts sur l'environnement lorsqu'il est considéré dans sa globalité. Par exemple, le recyclage des batteries usagées et la production de l'électricité pour la recharge doivent être prises en compte. Dans le cas le plus défavorable, l'énergie électrique est produite à partir de carburant fossile libérant du CO_2 dans l'atmosphère. Pour qu'un véhicule électrique puisse être qualifié de “propre”, l'énergie nécessaire à la charge doit être produite par des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, etc).

Il existe de nombreuses réalisations de véhicules électriques propulsés par des batteries. Deux exemples parmi toutes les réalisations faites sont la “Jamais Contente” [14] et la T-Zero conçue par AC Propulsion [20].

2.2.3 Véhicules dont la source d'énergie est un volant d'inertie

Les figures 2.3 et 2.4 représentent le schéma bloc d'un véhicule alimenté par un volant d'inertie. Deux types de couplages sont possibles entre le volant d'inertie et les roues : mécanique (figure 2.3) ou électrique (figure 2.4). Toute l'énergie de traction pour le parcours est stockée sous forme mécanique par rotation du volant d'inertie. Lors d'un arrêt du véhicule, il peut être connecté au réseau électrique industriel pour recharger le volant d'inertie (augmentation de sa vitesse de rotation).

Le principal inconvénient lié à l'utilisation d'un volant d'inertie à

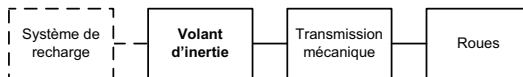


FIG. 2.3 – Véhicule dont la source d'énergie est un volant d'inertie (couplage mécanique)

2.2. Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

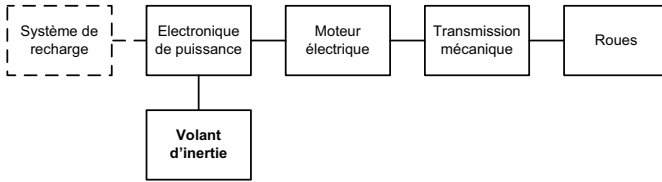


FIG. 2.4 – Véhicule dont la source d'énergie est un volant d'inertie (couplage électrique)

bord d'un véhicule concerne un problème de sécurité : une importante masse en rotation embarquée dans un véhicule peut avoir de graves conséquences lors d'un accident.

Divers développements utilisant un volant d'inertie embarqué à bord d'un véhicule ont été faits. Il est possible de mentionner le Gyrobus d'Yverdon [21], un bus utilisé dans la ville de Bâle [7], [22] et un tram développé par la compagnie Alstom pour la ville de Rotterdam [23].

2.2.4 Véhicules dont la source d'énergie est de l'air comprimé

La figure 2.5 représente la structure d'un véhicule dont la source d'énergie est de l'air comprimé. Dans ce type de véhicule, l'énergie est contenue dans de l'air comprimé dans des réservoirs sous pression (généralement 300 bars). Un moteur spécialement développé est utilisé pour fournir l'énergie de rotation des roues à partir du gaz sous pression. La recharge des réservoirs en air peut s'effectuer soit dans des stations de recharge (durée 3 minutes), soit par utilisation du réseau électrique industriel (durée de recharge 4 heures).

L'avantage de ce type de véhicule est qu'il ne rejette pas de gaz pol-

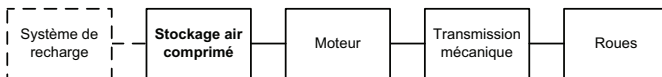


FIG. 2.5 – Véhicule dont la source d'énergie est de l'air comprimé

2.2. Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

luants localement lors de son utilisation. Le procédé utilisé pour comprimer l'air doit être pris en compte lors de l'évaluation des effets sur l'environnement. L'énergie utilisée pour la recharge en air comprimé est dans la majorité des cas obtenue en utilisant de l'énergie de type électrique. Les remarques concernant la production de cette énergie sont identiques au cas d'un véhicule électrique (section 2.2.2).

Les deux inconvénients de l'utilisation de cette source d'énergie sont :

- Risque d'explosion des réservoirs en cas d'accident
- Faible densité en énergie (kWh/kg) et donc faible autonomie du véhicule

Des véhicules utilisant cette source d'énergie sont construits par l'entreprise Tata en partenariat avec MDI [24]. Dans ce cas, le volume des réservoirs d'air est de 300 litres, la pression est de 300 bars, ce qui représente une énergie stockée de 12.7 kWh.

2.2.5 Véhicules dont la source d'énergie est une pile à combustible

La figure 2.6 présente la structure standard d'un véhicule dont l'énergie de traction est fournie par une pile à combustible. Dans ce cas, l'énergie primaire est l'hydrogène. Dans la grande majorité des cas, elle est stockée sous forme gazeuse dans des réservoirs sous pression. Dans le futur, d'autres formes de stockage de l'hydrogène présentent un important potentiel, par exemple les hydrures métalliques [25]. Dans une pile à combustible, l'hydrogène réagit avec de l'oxygène (prélevé dans l'air ambiant) pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Dans le cas des véhicules, seule l'électricité est utilisée pour alimenter le moteur de traction. Cette réaction chimique ne libère aucune émission polluante dans l'atmosphère. Des détails complémentaires sont donnés dans [26]. La réaction dans une pile à combustible est la suivante :



La réaction dans une pile à combustible ne libère pas de gaz polluants dans l'atmosphère, mais les procédés actuels de production d'hydrogène ont un rendement faible et peuvent avoir un impact sur l'environnement important.

2.2. Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

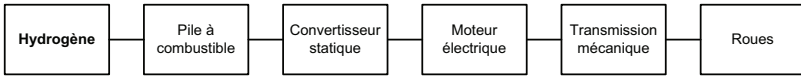


FIG. 2.6 – Véhicule à base de pile à combustible standard

Sans système de stockage d'énergie additionnel, comme c'est le cas pour tous les véhicules exploitant une pile à combustible, toute l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur. Ainsi, jusqu'à 80 % (montré à la fin de ce chapitre) de l'énergie fournie par la pile à combustible est dissipée lors des freinages. Il existe donc un important potentiel pour augmenter le rendement énergétique du véhicule en ajoutant un système de stockage d'énergie embarqué pour récupérer l'énergie de freinage. Dans ce cas, le véhicule est classifié dans la catégorie des véhicules hybrides [27].

La solution d'utiliser l'hydrogène comme source d'énergie primaire dans les véhicules est prometteuse pour une solution à long terme. Cependant, elle n'est pas envisageable pour du court terme à cause du prix élevé des piles à combustible, du manque de réseaux de distribution d'hydrogène de type "propre", des problèmes liés au réservoir et de tous les problèmes techniques qui doivent encore être résolus.

De nombreuses études concernant l'utilisation de piles à combustible pour alimenter des véhicules ont été faites. Une de ces études a été réalisée par la société Michelin en partenariat avec le Paul Scherrer Institut (PSI) et a consisté à développer la Michelin Hy-Light [28].

2.2.6 Véhicules hybrides

Un véhicule hybride possède deux sources d'énergie embarquées pouvant être utilisées pour la propulsion du véhicule. Il existe dans la littérature de nombreuses définitions pour caractériser et définir un véhicule hybride [15] [29] [30] [31] et [32]. Dans cette thèse, la définition suivante est retenue : un véhicule hybride est un véhicule ayant deux sources d'énergie embarquées de nature différente.

Dans ce document, lorsque les deux sources d'énergie embarquées ont des caractéristiques différentes, le véhicule est appelé hybride. Ainsi, un véhicule ayant à son bord une batterie et un banc de supercondensateurs (les deux types sont des stockeurs d'énergie électrique, mais ayant des

caractéristiques différentes) est un véhicule hybride. Une méthode de modélisation spécialement dédiée aux véhicules de type hybride a été définie dans [33] et [34].

Le type de véhicule hybride le plus courant est composé d'un moteur thermique et d'un accumulateur d'énergie électrique. Dans ce cas, le moteur thermique est identique à celui d'un véhicule standard non hybride, mais son fonctionnement peut être découplé des roues. En effet, la puissance de traction est fournie conjointement par les deux sources d'énergie embarquées.

L'ajout d'un stockeur d'énergie de type électrique dans un véhicule permet de récupérer son énergie de freinage. Dans ce cas, le moteur électrique fonctionne en mode génératrice et réinjecte la puissance de freinage dans le stockeur d'énergie. L'énergie récupérée est ensuite réinjectée dans le système de traction lors des phases suivantes d'accélération. Il existe actuellement différentes réalisations de véhicules hybrides sur le marché. Les exemples les plus connus sont la Toyota Prius qui combine un moteur à essence de 1.5 litre (52 kW) avec un stockeur d'énergie de type batterie [16] [35], la Honda Insight exploitant un moteur thermique de 1.0 l (50 kW) et une batterie [35] et la Honda Civic IMA composée d'un moteur à essence de 1.3 l et d'une batterie [36].

Cette technologie est actuellement connue, mais le nombre de cycles charge-décharge du stockeur d'énergie reste un problème. Pour le cas de la Toyota Prius, utilisant une batterie de type Ni-MH, ce problème est résolu en utilisant une faible profondeur de décharge où seulement 40 % de la capacité nominale de la batterie est exploité [35]. Ainsi, la durée de vie de la batterie est compatible avec celle d'une voiture.

Les figures 2.7, 2.8 et 2.9 présentent les trois structures standard pour les véhicules hybrides où la source d'énergie primaire est composée d'un carburant. La figure 2.7 représente un véhicule hybride série, la figure 2.8 un véhicule parallèle et la figure 2.9 un véhicule série-parallèle. Les avantages et les propriétés de chacun de ces différents types de véhicules sont donnés dans [15] [29] [32].

Pour les véhicules, quelle que soit leur source d'énergie primaire, il est possible d'ajouter un système de stockage d'énergie embarqué. Dans ce cas, le véhicule est qualifié d'hybride et un système d'assistance en puissance peut être défini. La puissance nécessaire pour la traction est alors fournie conjointement par la source d'énergie primaire et le stockeur d'énergie.

2.2. Solutions pour diminuer les gaz polluants et les pertes énergétiques

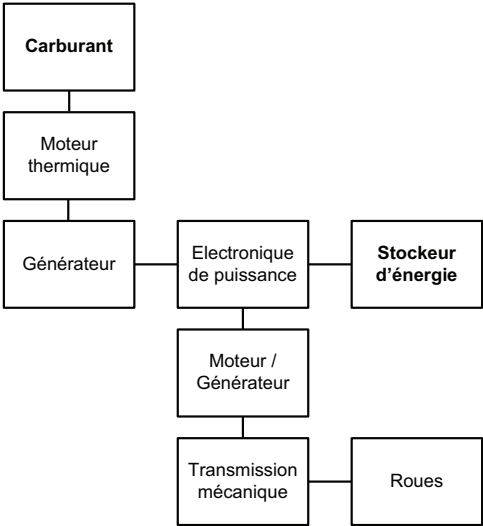


FIG. 2.7 – Véhicule hybride série

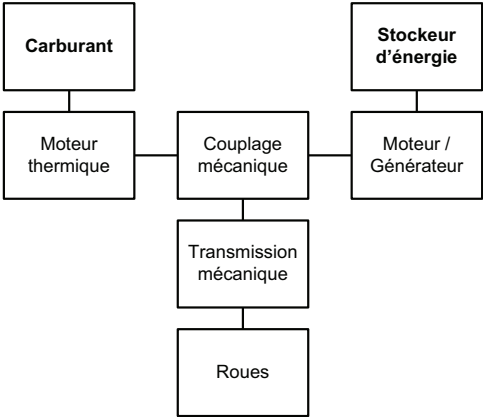


FIG. 2.8 – Véhicule hybride parallèle

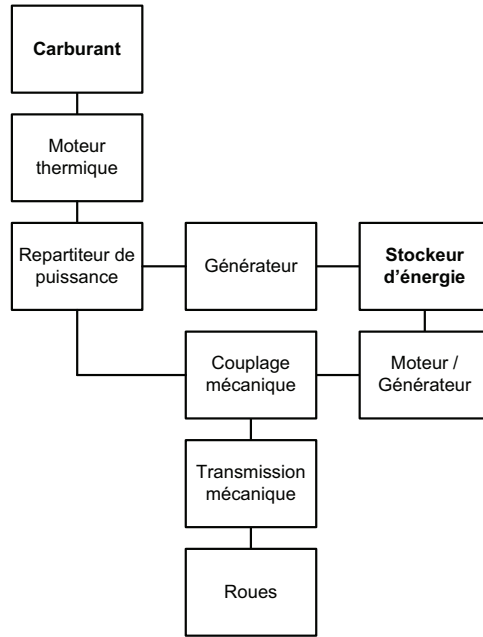


FIG. 2.9 – Véhicule hybride série - parallèle

Par rapport à un véhicule standard, l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué présente les avantages des véhicules hybrides dont au moins une des deux sources d'énergie est bidirectionnelle. Premièrement, l'énergie de freinage peut être récupérée. Dans ce cas, le moteur électrique fonctionne en mode génératrice et l'énergie récupérée est stockée. Lors de l'accélération suivante, l'énergie stockée est réinjectée dans la chaîne de traction. La gestion de la charge et de la décharge du stockeur d'énergie est réalisée par un convertisseur statique. Le second avantage est associé au fait que deux sources d'énergie sont disponibles à bord. Ainsi, la puissance nécessaire pour la traction peut être fournie conjointement par les deux sources. La première source d'énergie est ainsi découplée, du point de vue de la puissance fournie, du moteur de traction. Elle peut ainsi être exploitée pour fonctionner en permanence dans sa plage de

fonctionnement à meilleur rendement.

Dans un cas de fonctionnement avec deux sources d'énergie, la première source n'a pas besoin d'être dimensionnée pour fournir les contraintes élevées en puissance lors des accélérations. Ainsi, il est possible d'utiliser un moteur de plus faible valeur associé à cette première source d'énergie. Ce concept de réduction s'appelle "downsizing".

Dans ce travail un système d'assistance en puissance est appelé optimal lorsque le stockeur d'énergie embarqué absorbe les contraintes en puissance et que la source d'énergie primaire est utilisée pour fournir la puissance moyenne du parcours complet.

Ce concept d'assistance en puissance permettant d'augmenter le rendement énergétique d'un véhicule par récupération de l'énergie de freinage et par exploitation de la source d'énergie primaire de manière optimale est la solution qui est approfondie dans ce travail au sens de l'augmentation potentielle du rendement énergétique. La dernière section de ce chapitre présente le gain qui peut être atteint sur la consommation énergétique du véhicule en fonction du type de véhicule et du parcours.

Les contraintes en puissance dues à la traction ont été reportées de la source primaire sur le stockeur d'énergie. Ce dernier doit donc avoir une densité en puissance élevée (W/kg) et une durée de vie suffisante. Les différents types de stockeurs possibles sont donnés dans le chapitre 3.

2.3 Concept de l'assistance en puissance pour véhicules

Le système d'assistance en puissance proposé dans ce travail consiste à ajouter un stockeur d'énergie embarqué. Dans ce cas, l'énergie moyenne nécessaire à la traction est fournie par la première source d'énergie et toutes les excursions en puissance sont fournies par le stockeur additionnel. Lors des phases de freinage, l'énergie cinétique du véhicule est convertie en énergie électrique. Le moteur électrique est alors utilisé en mode génératrice et l'énergie produite est utilisée pour recharger le stockeur embarqué.

La taille du stockeur est déterminée en fonction des caractéristiques du véhicule : masse, propriétés dynamiques, etc et du parcours : vitesse maximale, pente, etc. Cette section présente une méthode de dimensionnement de calcul optimal de la taille du stockeur d'énergie dans le

but de maximiser le rendement énergétique du système. Cette méthode se base sur un parcours accélération-freinage type compris entre deux arrêts.

En fonction des différents paramètres pris en compte, il est possible de déterminer si un système d'assistance en puissance permet effectivement de diminuer la consommation énergétique du véhicule en prenant en compte l'ajout de poids dû au stockeur embarqué. Par exemple, il est montré dans ce chapitre que lors d'un parcours où la durée de la phase à vitesse constante est beaucoup plus longue que le temps d'accélération, un stockeur embarqué ne permet pas de diminuer la consommation.

2.3.1 Contraintes en puissance sur un parcours

Le type de parcours retenu dans cette section ne comporte pas de courbes, pas de passages dans des tunnels et la déclivité est constante. Il est constitué de 3 phases distinctes :

1. Accélération. Lors de cette phase, la valeur de l'accélération est constante. Les contraintes dynamiques sur le véhicule sont donc identiques pour tous les cas présentés.
2. Vitesse constante. Durant cette phase, la vitesse du véhicule est constante. Les moteurs de traction fournissent seulement la force nécessaire pour contrer les forces s'opposant à l'avancement du véhicule telles que les forces de friction et la force due à la déclivité.
3. Freinage. Dans ce cas, la valeur de l'accélération est constante et est égale à celle de la phase 1, mais est de signe opposé.

La modélisation du véhicule est présentée dans la figure 2.10. La force F_{in} correspond à la force produite par le véhicule et la force F_{ex} aux forces extérieures au véhicule (frottement et déclivité). La masse m correspond au poids à vide du véhicule et l'angle α correspond à l'angle formé entre l'horizontale et le véhicule.

Il est dès lors possible de donner l'équation suivante [37] :

$$F_{in} - F_{ex} = m^* \cdot a \quad (2.2)$$

Dans ce cas, la masse m^* correspond à la masse corrigée du véhicule qui prend en compte l'inertie des masses en mouvement dans le véhicule (coefficient ζ) [37] [38] et pour plus de détails, voir la section 2.10. La masse m_e correspond à la masse embarquée dans le véhicule.

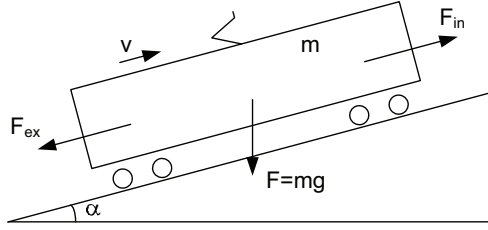


FIG. 2.10 – Représentation des forces dans un véhicule

Dans ce cas, la masse corrigée du véhicule est la suivante :

$$m^* = \zeta \cdot m + m_e \quad (2.3)$$

Les forces extérieures au véhicules F_{ex} sont données par l'équation suivante :

$$F_{ex} = F_f + F_d \quad (2.4)$$

La force F_f correspond à la force de frottement, elle est donnée par : $F_f = A_f \cdot v^2 + B_f \cdot v + C_f$. La force F_d correspond à la force due à la déclivité et vaut : $F_d = \sin(\alpha) \cdot (m + m_e) \cdot g$. Dans le cas où la déclivité i est exprimée en pour mille, l'angle α est donné par : $\tan(\alpha) = i \cdot 1000$. Il est en général possible de confondre le sinus et la tangente pour des déclivités inférieures ou égales à 120 ‰ [37] [38].

En faisant l'hypothèse que tous les composants du système sont idéaux (rendement unitaire), la puissance nécessaire aux roues est donnée par la relation :

$$P = (m^* \cdot a + F_{ex}) \cdot v \quad (2.5)$$

Dans cette équation, une puissance positive correspond à la puissance consommée par le système de traction et une puissance négative correspond à une puissance récupérée par le système de traction. Dans un véhicule standard sans stockeur d'énergie, toute la puissance négative, notamment lors des phases de freinages, est dissipée.

L'énergie correspond à l'intégrale de la puissance lorsque celle-ci est positive. Dans le cas où le parcours ne présente pas de déclivité, la puissance est positive lors des phases 1 et 2. L'énergie dissipée sur le

parcours correspond à l'intégrale de la puissance lorsque celle-ci est négative. Dans le cas où le parcours n'a pas de déclivité, la puissance est négative lors de la phase 3.

Dépendance en fonction de la masse à vide du véhicule

Cette section présente la dépendance entre la puissance de traction et la masse du véhicule. Dans cet exemple, les forces de frottement aérodynamiques correspondent à un véhicule de type tram, les rendements des différents composants de la chaîne de traction sont supposés idéaux, le véhicule est chargé de 200 passagers de 80 kg et le parcours ne présente pas de déclivité. La vitesse atteinte par le véhicule est de 70 km/h , son accélération est de 1.2 m/s^2 et l'hypothèse est faite que les forces de frottement aérodynamique sont indépendantes de la masse du véhicule. La figure 2.11 présente les courbes des puissances pour quatre valeurs de poids à vide du véhicule.

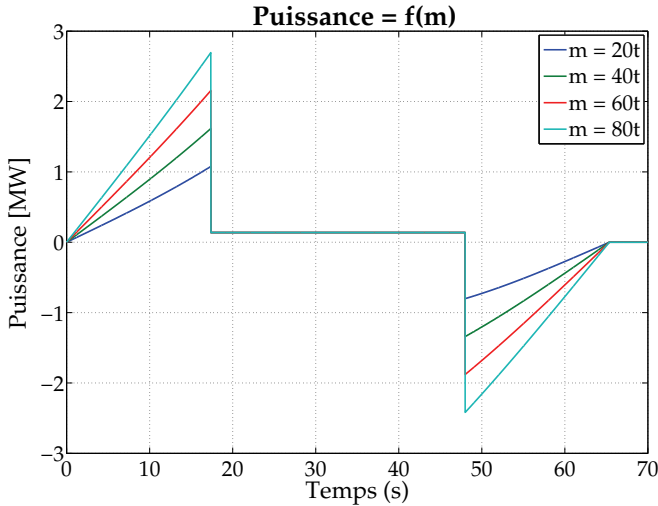


FIG. 2.11 – Contraintes en puissance en fonction de la masse du véhicule (véhicule chargé de 200 personnes)

Le tableau 2.1 présente l'énergie consommée et l'énergie dissipée par le véhicule pour les quatre cas de poids à vide du véhicule. Il est à noter

Poids à vide [t]	Energie consommée [kWh]	Energie dissipée [kWh]	Energie dissipée [%]
20 t	3.65	2.05	56
40 t	4.95	3.34	67
60 t	6.26	4.65	74
80 t	7.56	5.95	78

TAB. 2.1 – Energie consommée et énergie dissipée en fonction de la masse du véhicule (véhicule chargé de 200 personnes)

que l'énergie consommée et l'énergie dissipée augmentent proportionnellement par rapport à la masse à vide du véhicule. Du fait que le temps d'accélération est important (30 %) par rapport au temps du parcours complet, l'énergie correspondant aux forces de frottement est faible par rapport à l'énergie fournie lors de l'accélération. Ainsi, dans tous les cas présentés dans cette section, l'énergie dissipée correspond à plus de 56 % de l'énergie fournie aux roues lors des accélérations. Dans le cas le plus défavorable ($m = 80$ t), jusqu'à 78 % de l'énergie fournie aux roues est dissipée lors des freinages.

Un système d'assistance en puissance avec un stockeur embarqué permet de réduire la consommation énergétique du véhicule par un facteur correspondant à l'énergie dissipée. Le gain sur la consommation est donc compris entre 56 et 78 % pour les cas présentés dans cette section.

Dépendance en fonction de la déclivité

Cette section présente la relation existant entre la déclivité et l'énergie nécessaire pour un véhicule. Dans ce cas, le type de véhicule est identique au cas présenté dans la section précédente. Les contraintes dynamiques et la longueur du parcours sont également identiques. Le poids à vide du véhicule est de 40 tonnes et la masse embarquée correspond à 200 passagers de 80 kg.

La figure 2.12 présente les courbes de puissance en fonction de la déclivité α . Une valeur négative correspond à une descente et une valeur positive à une montée.

Dans le cas d'une descente de -9° , la puissance du moteur est en

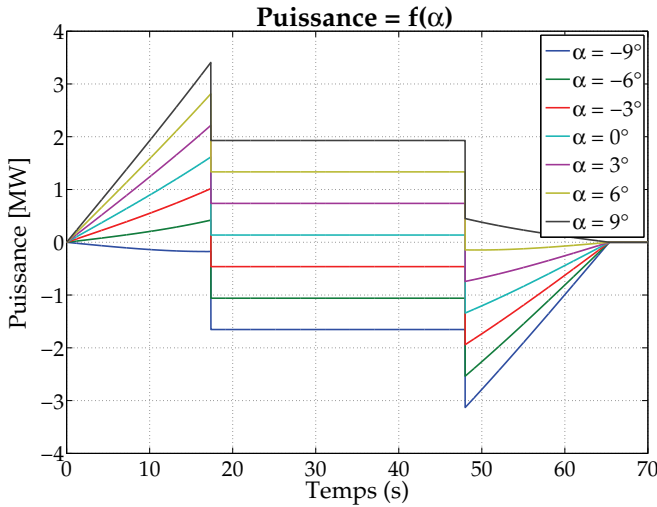


FIG. 2.12 – Contraintes en puissance en fonction de la pente α

permanence négative, et donc aucune énergie n'est consommée. Lors d'une montée de 9° , la puissance du moteur est en permanence positive. Le potentiel d'énergie qui peut être récupéré lors du freinage est alors nul.

Le tableau 2.2 présente l'énergie consommée et l'énergie dissipée en fonction de la déclivité. Pour des pentes supérieures à 9° , l'ajout d'un système de stockage d'énergie pour récupérer l'énergie de freinage ne permet pas de diminuer la consommation du véhicule. Dans tous les autres cas, un stockeur d'énergie permet de diminuer la consommation énergétique du véhicule. Le gain est alors de 2.5 % pour une pente de 6° .

Dans le cas d'une descente avec une forte pente, l'énergie pouvant être récupérée est supérieure à l'énergie nécessaire sur le parcours. Sur un parcours de ce type, un système d'assistance en puissance dimensionné sur le parcours complet (montée et descente) permet de diminuer la consommation énergétique du véhicule en récupérant l'énergie lors de la descente et en la réinjectant lors de la montée. Ce principe sera présenté dans le chapitre 5, où un véhicule de type diesel-électrique est pris comme exemple.

α [°]	Energie consommée [kWh]	Energie dissipée [kWh]	Energie dissipée [%]
-9	0	22.3	100
-6	0.89	15.3	100
-3	2.33	8.72	100
0	4.95	3.34	67.5
3	11.5	1.90	16.5
6	18.0	0.46	2.6
9	25.5	0	0

TAB. 2.2 – Energie consommée et énergie dissipée en fonction de la déclivité

2.3.2 Système optimal d'assistance en puissance

Cette section présente la méthode de dimensionnement du système de stockage embarqué optimal pour réaliser la fonction d'assistance en puissance sur un parcours accélération-freinage. Dans ce cas, la première source d'énergie est dimensionnée pour fournir la puissance moyenne sur la totalité du parcours incluant les phases accélération - vitesse constante - freinage. Toutes les contraintes en puissance s'écartant de la valeur moyenne sont fournies par la seconde source d'énergie embarquée, dans ce cas le stockeur d'énergie.

Le parcours type est identique à celui qui a été retenu dans les deux sections précédentes. La masse à vide du véhicule est de 40 tonnes, il est chargé de 200 personnes de 80 kg et le parcours ne présente pas de déclivité. La figure 2.13 présente les courbes de puissances pour ce cas de véhicule avec et sans stockeur d'énergie. Dans le cas comportant un stockeur d'énergie embarqué, la correction due à l'augmentation de poids est prise en compte. La densité en énergie du stockeur pour ce calcul est de 15 kJ/kg et correspond à un stockeur d'énergie de type supercapacitif. La méthode itérative de calcul retenue est :

1. Calcul de la puissance totale et de la puissance moyenne sur le parcours pour le véhicule sans stockeur d'énergie
2. Calcul de la puissance devant être fournie ou récupérée par le stockeur $P_{sc} = P_{mo} - < P_{mo} >$

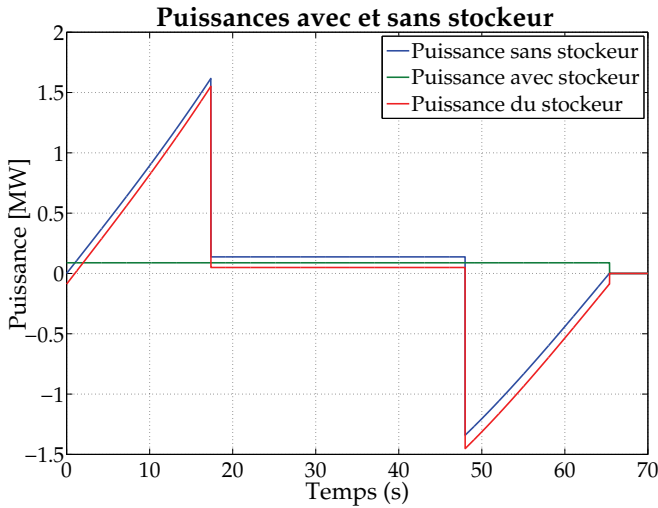


FIG. 2.13 – Contraintes en puissance avec un système d'assistance en puissance optimal

3. Calcul de la variation d'énergie sur le stockeur $E_{sc} = \int P_{sc} \cdot dt$
4. Calcul de la masse du stockeur correspondant à l'excursion maximale d'énergie $\max(E_{sc}) - \min(E_{sc})$
5. Calcul de la puissance totale et de la puissance moyenne en ajoutant la masse du stockeur à la masse à vide du véhicule. Cette boucle de calcul est effectuée trois fois.

Dans le cas sans stockeur d'énergie, l'énergie utilisée pour le parcours est de 4.95 kWh. Dans le cas où un stockeur d'énergie est embarqué, l'énergie fournie par la première source d'énergie est de 1.61 kWh, la puissance est constante et vaut 88 kW. La diminution de consommation est de 67 %, et elle est obtenue en utilisant un stockeur de 2.85 tonnes (3.96 kWh).

2.3.3 Gain sur le rendement énergétique en fonction de la longueur du parcours et du poids à vide du véhicule

Cette section présente le gain qu'il est possible d'obtenir en ajoutant un système de stockage d'énergie embarqué dans un véhicule. Les résultats sont présentés pour deux types de véhicules différents qui se différencient par leurs forces de frottement. Le premier correspond à un véhicule de type tram et le second à un véhicule léger de type scooter. Dans le premier cas, la masse embarquée est de 0 kg alors que dans le second, le poids embarqué correspond à une personne de 80 kg.

Les résultats montrés dans ce chapitre sont donnés pour un parcours dont la longueur varie entre 0 et 10 km et pour un poids à vide du véhicule compris entre 0 et 100 t pour le premier exemple et entre 0 et 1 t pour le second exemple. Dans tous les graphiques présentés dans la suite de ce chapitre, l'axe représentant le poids à vide du véhicule ne prend pas en compte le poids du stockeur d'énergie. Toutefois, dans les calculs de la consommation et du gain sur le rendement énergétique, ce poids additionnel est pris en compte.

Le gain sur la consommation d'énergie est dépendant de la vitesse maximale atteinte par le véhicule sur le parcours. Deux vitesses ont été retenues : 75 et 25 km/h . Dans tous les graphiques présentés dans cette section, la valeur de l'accélération est de $1.2 m/s^2$.

Le graphique 2.14 présente la consommation pour un véhicule dont les caractéristiques des forces de frottement correspondent à un tram sur un parcours sans déclivité en fonction du poids du véhicule et de la longueur du parcours. Dans le cas où le poids du véhicule est faible (inférieur à 5 tonnes), les forces de frottement sont du même ordre de grandeur que la force produite par le véhicule F_{in} lors de l'accélération. Ainsi, la consommation du véhicule est très peu dépendante de sa masse dans ce cas.

Lorsque le poids du véhicule est supérieur à 5 tonnes, la dépendance entre l'énergie consommée et le poids est linéaire. Dans ce cas, l'énergie nécessaire à vaincre les forces de frottement est faible par rapport à l'énergie nécessaire pour accélérer le véhicule. L'énergie pour accélérer

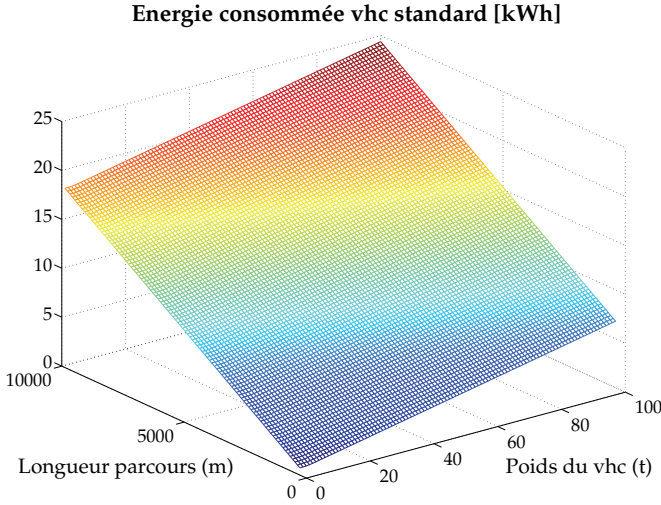


FIG. 2.14 – Energie consommée par le véhicule sans stockeur ;
vhc de type tram, $m_e = 0$ t, $v_{max} = 75$ km/h

le véhicule E_a est dépendante linéairement de la masse :

$$E_a = \int_0^{T_a} F \cdot v \cdot dt = \int_0^{T_a} m^* \cdot a^2 \cdot dt \quad (2.6)$$

La figure 2.15 présente la masse du stockeur qui doit être embarqué dans le véhicule selon le dimensionnement optimal de ce dernier. La puissance de la première source d'énergie correspond dès lors à la moyenne de la puissance lors du parcours complet et toutes les contraintes en puissance sont fournies par la seconde source d'énergie (stockeur). La densité énergétique du stockeur est de 15 kJ/kg et correspond à un stockeur de type supercapacitif.

La figure 2.16 présente la diminution de la consommation énergétique du véhicule lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué. La diminution est la plus élevée, supérieure à 80 %, lorsque le parcours est court (moins de 1 km). Ceci est dû au rapport entre l'énergie nécessaire pour accélérer le véhicule E_a et l'énergie nécessaire pour vaincre les forces de frottement E_f .

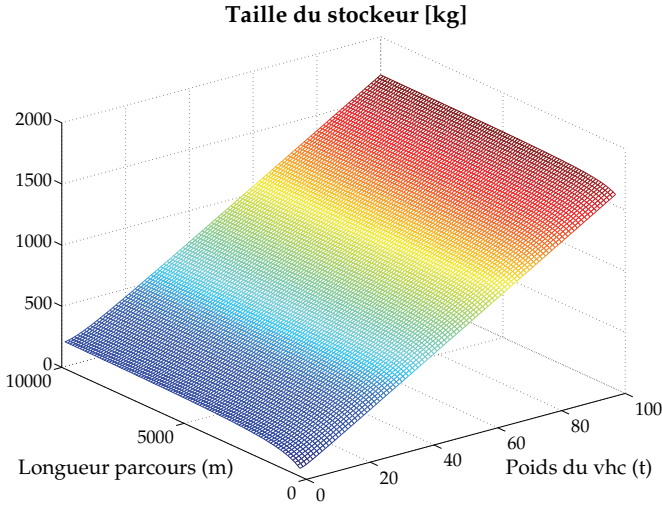


FIG. 2.15 – Taille optimale du stockeur ; vhc de type tram,
 $m_e = 0$ t, $v_{max} = 75$ km/h

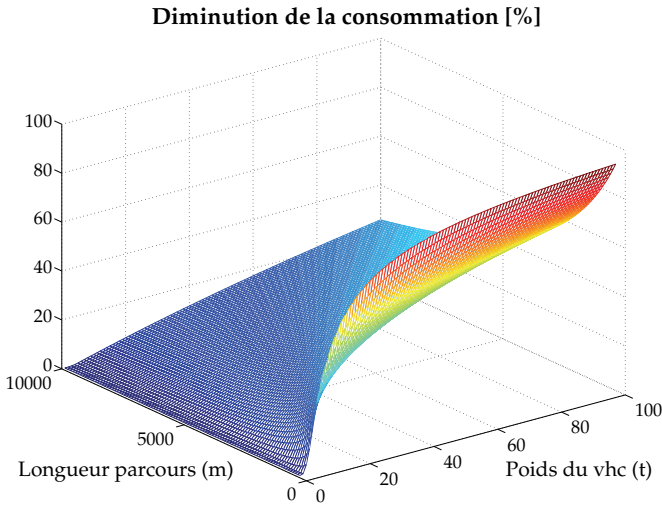


FIG. 2.16 – Réduction de la consommation ; vhc de type tram, $m_e = 0$ t, $v_{max} = 75$ km/h

La figure 2.17 présente le gain sur la consommation énergétique lorsque le même véhicule accélère dans les mêmes conditions jusqu'à une vitesse de 25 km/h. Dans ce cas, l'énergie pour accélérer le véhicule E_a est plus faible que dans le cas précédent et une importante réduction de la consommation énergétique est seulement observée pour de faibles distances. La décroissance est plus rapide que dans le cas précédent.

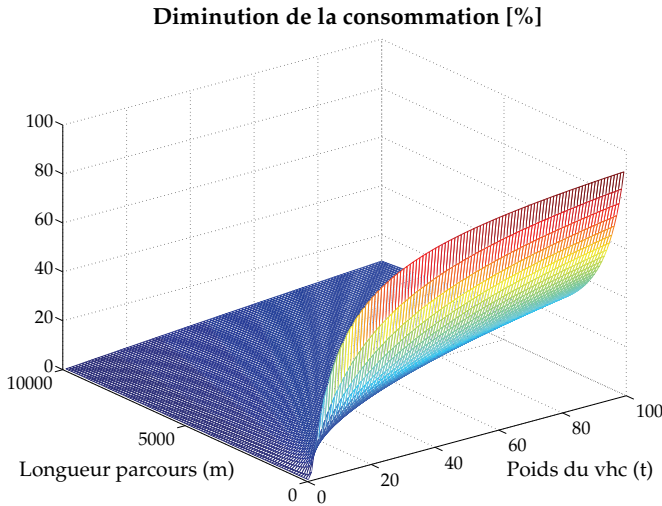


FIG. 2.17 – Réduction de la consommation ; vhc de type tram, $m_e = 0$ t, $v_{max} = 25$ km/h

La figure 2.18 présente le graphique de la réduction de la consommation pour un véhicule de type scooter où une personne de 80 kg est ajoutée au poids à vide du véhicule. Dans ce cas, pour un poids à vide du véhicule inférieur à 80 kg, l'ajout d'un système de stockage d'énergie ne permet pas de diminuer la consommation énergétique du véhicule. Pour un parcours de plus de 2 km, la réduction de la consommation est également nulle.

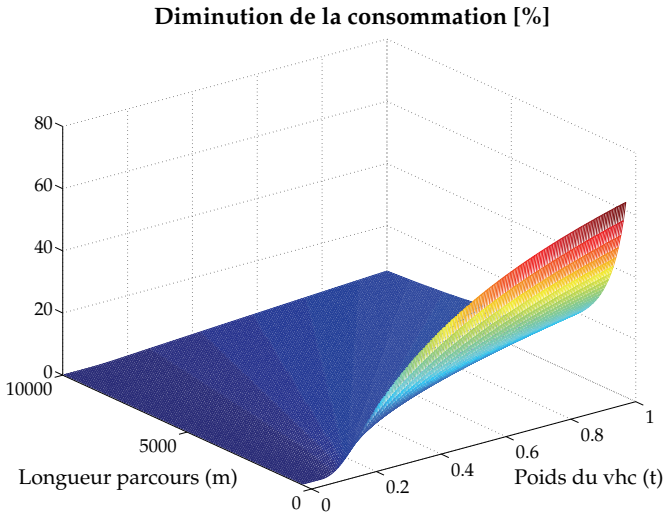


FIG. 2.18 – Réduction de la consommation ; vhc de type scooter, $m_e = 80$ kg, $v_{max} = 75$ km/h

2.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté les différentes possibilités pour diminuer les émissions polluantes dues aux véhicules. Deux approches différentes peuvent être suivies : la première concerne l'utilisation de véhicules utilisant une source d'énergie autre que le pétrole et la seconde consiste à améliorer le rendement énergétique du véhicule.

Pour la première approche, il est possible de remplacer le combustible par exemple par une batterie, un volant d'inertie ou un système de stockage à air comprimé. Pour la seconde approche, il est possible d'ajouter un système d'hybridation du véhicule par l'ajout d'un stockeur d'énergie embarqué. Dans ce cas, l'énergie usuellement dissipée lors des freinages dans un véhicule standard est récupérée et est réinjectée dans le système de traction lors de l'accélération suivante. Ce principe est celui qui est retenu pour la suite de ce travail.

En ajoutant un stockeur d'énergie embarqué, il est possible de réaliser un système d'assistance en puissance. Dans ce cas, la puissance

moyenne de traction est fournie par la première source d'énergie et les contraintes en puissance sont fournies par le stockeur d'énergie. La taille du moteur associé à la première source d'énergie peut être diminuée, il s'agit du concept de "downsizing". Dans le cas où le premier moteur est de type thermique, il est possible de l'exploiter en permanence dans sa plage de fonctionnement à haut rendement (la puissance fournie par ce moteur est constante).

Le gain qu'il est possible d'atteindre par l'ajout d'un système de stockage d'énergie a été déterminé dans ce chapitre. Ce calcul a été fait pour différents types de véhicules et pour différents parcours. Ainsi, le gain est le plus important lorsque la distance entre deux arrêts est faible.

Le système d'assistance en puissance est associé à un stockeur d'énergie embarqué. Le chapitre 3 présente les différents types de stockeurs qui peuvent être utilisés à bord de véhicules. Les chapitres suivants présentent les résultats détaillés pour trois catégories de véhicules différents.

Chapitre 3

Les différents types d'accumulateurs d'énergie

3.1 Introduction

Le chapitre 2 a présenté les différentes possibilités pour augmenter le rendement énergétique des véhicules et diminuer les impacts sur l'environnement. La solution qui est étudiée dans cette thèse consiste à ajouter un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué et de conserver la source d'énergie qui est déjà présente dans le véhicule. Les structures pour connecter le stockeur d'énergie dans le véhicule sont identiques aux véhicules hybrides et ont été présentées dans le chapitre 2. En fonction du type de couplage, l'accumulateur d'énergie embarqué peut être de type mécanique ou électrique.

Ce chapitre présente les différents types d'accumulateurs d'énergie qui ont les propriétés requises pour la fonction d'assistance en puissance pour les véhicules [39]. Une de ces propriétés est la bidirectionnalité en énergie du stockeur pour récupérer de manière optimale l'énergie de freinage et la réinjecter dans le système de traction lors des accélérations.

tions suivantes. La seconde partie de ce chapitre présente une comparaison entre les différentes technologies d'accumulateurs. Les critères retenus sont la densité énergétique (J/kg), la densité de puissance (W/kg), l'énergie qu'il est possible d'extraire du stockeur en fonction de la puissance de décharge et la durée de vie.

Ce chapitre se limite à présenter les stockeurs d'énergie pouvant être intégrés dans un véhicule. Les stockeurs destinés à être utilisés de manière fixe, par exemple le stockage par air comprimé dans des cavernes ou le stockage potentiel d'eau dans des barrages, ne sont donc pas présentés.

3.2 Types d'accumulateurs d'énergie pour les véhicules

Le chapitre 2 a présenté les différentes structures de couplages entre le stockeur d'énergie et le système de propulsion pour réaliser une fonction d'assistance en puissance. Les accumulateurs d'énergie pouvant être utilisés dans un véhicule pour réaliser une fonction d'assistance en puissance se classifient en deux catégories distinctes :

- Stockeurs mécaniques
- Stockeurs électriques

Pour toutes les structures de véhicules ayant un lien électrique entre le stockeur d'énergie et les autres composants de traction, la source d'énergie secondaire peut être soit un stockeur électrique, soit un stockeur mécanique. Dans le second cas, un moteur-générateur électrique est utilisé pour convertir l'énergie mécanique du stockeur en énergie électrique directement utilisable à bord du véhicule. Pour les véhicules utilisant un lien mécanique pour le couplage des différentes sources d'énergie à bord, seul un stockeur mécanique peut être utilisé de manière directe.

3.2.1 Accumulateurs d'énergie de type mécanique

Les deux types de stockeurs d'énergie sous forme mécanique qui sont présentés dans ce chapitre sont le volant d'inertie et le stockage par air comprimé.

Volant d'inertie

Un volant d'inertie est constitué par la mise en rotation d'une masse autour d'un axe [40]. La figure 3.1 présente le schéma du volant d'inertie utilisé dans les bus de la ville de Bâle [22] [7]. Ce volant d'inertie est fabriqué par l'entreprise Magnet-Motor, Allemagne. Dans ce cas, le rotor est composé de fibres de carbone et est représenté en noir dans la figure 3.1. Le couplage avec le reste du système de traction est réalisé par un lien électrique. Un moteur-générateur a été directement intégré avec le volant d'inertie comme il est possible de le voir sur la figure 3.1.

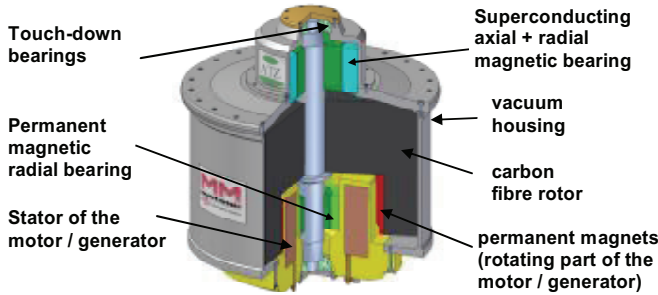


FIG. 3.1 – Volant d'inertie fabriqué par Magnet-Motor, utilisé dans les bus de Bâle ; Source : [22]

Dans un volant d'inertie, l'énergie est stockée sous forme cinétique par la mise en rotation d'une masse à l'aide d'un moteur électrique. La décharge est effectuée en utilisant la fonction génératrice du moteur pour produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique de rotation.

L'énergie stockée dans un volant d'inertie est la suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot I_{\Delta} \cdot \omega^2 \quad (3.1)$$

avec :

- E_c : Energie cinétique de rotation [J]
- I_{Δ} : Moment d'inertie [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
- ω : Vitesse angulaire [s^{-1}]

La densité énergétique d'un volant d'inertie est directement liée à la masse du rotor, à sa vitesse de rotation et aux matériaux utilisés pour le rotor. Pour les volants d'inertie récents, la masse en mouvement est composée de matériaux composites à haute énergie massique [41] alors que les anciens volants d'inertie étaient composés d'un disque en métal.

La puissance maximale de charge et de décharge du volant d'inertie est fixée par la puissance du moteur électrique lui étant associé. Pour garantir un haut rendement de ce type de stockeur et un taux d'autodécharge faible, des paliers spéciaux sont utilisés et l'enceinte dans laquelle le rotor est mis en rotation est sous faible pression [7]. Dans les volants d'inertie récents, les paliers utilisés sont très souvent de type magnétique, comme c'est le cas du volant d'inertie des bus de Bâle [22] et tout le système incluant le moteur-générateur est monté dans une enceinte hermétique sous vide.

Les principaux avantages de ce type de stockeur d'énergie sont :

- Ecologique ; le système ne comporte pas de produits chimiques qui doivent être recyclés
- Charge et décharge rapides ; la puissance de charge et de décharge est directement liée à la puissance du moteur électrique associé
- Durée de vie élevée ; elle peut atteindre 100 000 cycles [42]
- Faibles coûts de maintenance ; pas de dégradation de la quantité d'énergie pouvant être stockée en fonction du nombre de cycles accomplis [43]
- Haut rendement énergétique ; le rendement de ce type de stockeur est supérieur à 89 %

Les désavantages de ce type d'accumulateur d'énergie sont :

- Risques pour les passagers ; la masse en rotation peut être projetée en cas d'accident
- Effets gyroscopiques ; ils sont dus à la masse en rotation dans le véhicule [43]
- Vitesse de rotation élevée ; elle est nécessaire pour garantir une densité en énergie suffisante et impose de fortes contraintes sur les paliers
- Moteur électrique de taille importante ; la densité en puissance est directement liée à la puissance du moteur électrique associé

Dans la majorité des applications utilisant un volant d'inertie, la commande du moteur électrique associé est réalisée par un convertisseur statique de type DC/AC. Il est utilisé pour gérer la puissance de charge, respectivement de décharge du volant d'inertie. Ce type de convertisseur n'a pas un rendement unitaire, des pertes supplémentaires sont donc ajoutées dans le système [8].

Les bus de Bâle[22] sont un exemple de véhicules utilisant un volant d'inertie embarqué. Dès 1992, 12 bus de ce type sont exploités et chacun a plus de 200 000 heures d'utilisation. La structure interne du volant d'inertie utilisé est représentée dans la figure 3.1 et a été fabriquée par l'entreprise Magnet-Motor. Le poids du stockeur d'énergie est de 1200 kg pour une énergie nominale stockée de 5 kWh et une puissance électrique de 250 kW. La figure 3.2 représente une photo d'un de ces bus avec le volant d'inertie intégré à l'avant du véhicule.



FIG. 3.2 – Photo du volant d'inertie utilisé dans les bus de Bâle ; Source : www.tbuss.org.uk

Un autre véhicule utilisant un stockeur d'énergie composé d'un volant d'inertie embarqué est le tramway Citadis fabriqué par l'entreprise Alstom [44] [23]. Il est actuellement en cours de développement et de

3.2. Types d'accumulateurs d'énergie pour les véhicules

test dans la ville de Rotterdam. La photo 3.3 montre un tram de type Citadis. La figure 3.4 représente le système complet de stockage d'énergie qui a été ajouté sur le toit du tram. Il comprend le volant d'inertie et tous les composants annexes qui sont utilisés pour interfacer le volant d'inertie avec les autres composants de traction.



FIG. 3.3 – Photo d'un tram de type Alstom Citadis dans la ville de Rotterdam ; Source : www.collectiftramway.free.fr



FIG. 3.4 – Photo du volant d'inertie du tramway Alstom Citadis ; Source : [23]

Une réalisation exploitant un volant d'inertie dans un réseau de véhicules alimentés par caténaire a été développée en partenariat entre l'entreprise Urenco Power Technologies et la société exploitant les métros de Londres [45]. Dans ce cas, le volant d'inertie n'est pas embarqué dans un véhicule, mais est connecté directement à la caténaire. En fonction de la tension de ligne, le stockeur injecte, respectivement prélève de la puissance directement sur la caténaire. Ainsi, lorsqu'un véhicule freine à proximité du stockeur, la puissance réinjectée sur la caténaire peut être récupérée par le stockeur, ce principe a été expliqué dans [46].

Des volants d'inertie sans convertisseur de fréquence ont été utilisés dans des véhicules des transports publics de la région d'Yverdon [21]. Ces véhicules, nommés Gyrobus, ont été mis en service en 1953 et exploités pendant 7 ans. La seule source d'énergie à bord du véhicule était le volant d'inertie. Ce véhicule était une première mondiale exploitant ce système de propulsion.

La densité de puissance d'un volant d'inertie récent est compatible avec les exigences posées par un véhicule. Toutefois, des limites problématiques sont vite atteintes du point de vue de l'autonomie du véhicule, liée à la densité énergétique limitée des volants. Dans ce sens, des propositions de structures hybrides ont été faites à l'exemple de [47].

Air comprimé

Le principe de ce type de stockage est de comprimer de l'air à l'aide d'un compresseur entraîné par un moteur électrique. L'air ainsi comprimé est stocké dans un réservoir. Pour restituer l'énergie stockée, le moteur électrique fonctionne en génératrice lors de la détente de l'air.

Pour une application mobile, le réservoir peut être constitué de bouteilles. Elles doivent être dimensionnées selon les critères suivants : la pression maximale, la quantité d'énergie qui doit y être stockée et la résistance en cas de choc, par exemple lors d'un accident du véhicule. Principalement à cause des contraintes en matière de sécurité en cas de choc, le poids de ce type de réservoir est élevé. La densité en énergie est principalement liée à la pression maximale et au volume des bouteilles.

La densité en puissance est directement liée à la puissance maximale du moteur électrique et du compresseur utilisés pour la compression/décompression du gaz. Pour des applications typiques fonctionnant à une pression de 250 bars, la densité en énergie est d'environ

40 kWh/m^3 et la densité en puissance de 20 W/l . Dans ce type de véhicules, la gestion de la charge/décharge du stockeur d'énergie est réalisée par un système d'électronique de puissance associé au moteur électrique. Cette électronique de puissance est également utilisée pour régler les flux d'énergie à l'intérieur du véhicule comme dans le cas d'un volant d'inertie. Le rendement qu'il est possible d'atteindre avec ce type de stockeur d'énergie est compris entre 30 et 50 % [42].

Différentes études ont été faites concernant ce type de stockage d'énergie et sont décrites par exemple dans [42], [48], [49] ou [50]. Les aspects de rendement énergétique et de densité énergétique ont été décrits dans ces différents documents. Pour des applications stationnaires, des installations utilisant l'air comprimé comme stockeur d'énergie existent déjà et sont décrites dans [51], [52], ou ont été proposées récemment [50].

Un exemple d'application récent d'un stockeur d'énergie dans le domaine des véhicules a été conçu par l'entreprise Tata, se nomme la MiniCat [49] et a été développé en partenariat avec l'entreprise MDI. Dans ce véhicule, l'air comprimé représente la seule source d'énergie à bord. Le réservoir est composé de trois bouteilles de 100 litres chacune et la pression maximale est de 300 bars. L'énergie qui est ainsi stockée est de 12.7 kWh. L'accumulateur d'air comprimé utilisé est montré dans la figure 3.5. La figure 3.6 représente la voiture proposée par l'entreprise Tata.



FIG. 3.5 – Photo du réservoir d'air comprimé de la Tata MiniCat ; Source : www.zdnet.com



FIG. 3.6 – Photo de la Tata MiniCat, véhicule à air comprimé ; Source : www.zdnet.com

3.2.2 Accumulateurs d'énergie de type électrique

Les trois types de stockeurs d'énergie sous forme mécanique qui seront présentés dans ce chapitre sont les batteries, les supercondensateurs et les SMES.

Batteries

Les batteries correspondent à la solution la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. Les technologies actuellement sur le marché sont nombreuses et leurs caractéristiques sont données dans le tableau 3.1. Les détails concernant les différentes technologies de batteries se trouvent dans [53] [54] et [14].

La densité énergétique des batteries est élevée par rapport aux autres stockeurs présentés dans ce chapitre. Elle est au maximum de

3.2. Types d'accumulateurs d'énergie pour les véhicules

	Energie massique [Wh/kg]	Densité d'énergie [Wh/l]	Puissance massique [W/kg]	Densité de puissance [W/l]
<i>NiCd</i>	40-50	50-100	150-200	300-500
<i>NiH₂</i>	45-65	35-50	150-200	200-300
<i>NiMH</i>	50-70	140-180	150-200	300-500
<i>Li – ion</i>	90-150	150-250	200-220	400-500
<i>Li – po</i>	100-200	150-300	>200	>400

TAB. 3.1 – Types de batteries possibles pour le véhicule électrique ; Source : [54]

165 Wh/kg pour des batteries au Lithium. Par contre, la densité en puissance est faible, elle est au maximum de 2 kW/kg.

L'inconvénient majeur pour les batteries est leur faible cyclabilité. La durée de vie d'une batterie est de 100 à 1 000 cycles [42]. Sous certaines conditions, par exemple en limitant le taux de décharge à 80 %, il est possible d'augmenter le nombre de cycles jusqu'à 3 000 sans dégradation notable des propriétés de la batterie. La figure 3.7 présente la capacité relative d'une batterie de type lithium-polymère en fonction de la profondeur de décharge (DOD) et du nombre de cycles. Pour une application dans le domaine des transports, où les contraintes en puissance sont élevées et où le nombre de cycles est important, la durée de vie des batteries est souvent trop courte ; les batteries devraient être changées trop souvent ou la profondeur de décharge devrait être limitée par un important facteur.

Un autre inconvénient de ce type de stockeur concerne les matériaux chimiques qui sont utilisés. Ceux-ci n'ont pas un impact nul sur l'environnement et un processus rigoureux doit être suivi lors de leur recyclage.

Un exemple de réalisation d'un véhicule à base de batteries est la Tzero fabriquée par l'entreprise AC Propulsion. La figure 3.8 présente une photo de ce véhicule. Il correspond à une petite voiture de sport deux places.

La seule source d'énergie à bord du véhicule est composée d'un pack de batteries de type lithium-ion de 350 kilos. L'énergie stockée est de 50 kWh. La figure 3.9 présente une photo du pack de batteries utilisé.

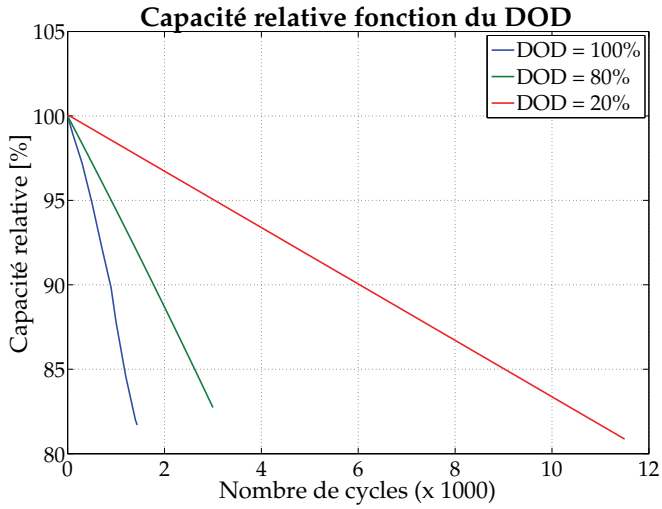


FIG. 3.7 – Capacité relative d'une batterie en fonction du DOD ; Source : www.kokam.com

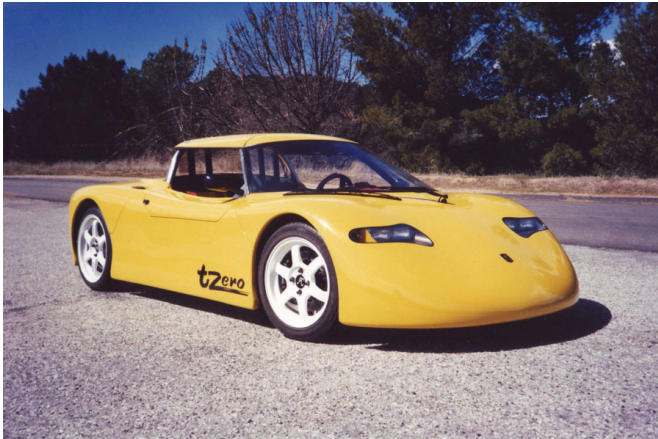


FIG. 3.8 – Photo de la Tzero ; Source : www.acpropulsion.com



FIG. 3.9 – Pack de batteries de la Tzero ; Source : en.wikipedia.org

Le poids du véhicule est de 900 kilos, la puissance de 165 kW. L'autonomie maximale qu'il est possible d'atteindre en mode de fonctionnement optimal est de 480 kilomètres. Dans ce cas, la voiture roule à une vitesse constante de 96 km/h, sans arrêts. Cette autonomie est nettement plus faible dans un cas réel de circulation, c'est-à-dire avec des phases d'accélération-freinage.

Un autre exemple utilisant une batterie comme source d'énergie auxiliaire est la Toyota Prius. Des batteries de type Ni-MH ont été utilisées. Le stockeur d'énergie est composé de 38 modules de 6 cellules. L'énergie nominale pouvant être stockée est de 1778 Wh pour un poids de 53.3 kg [35].

Supercondensateurs

Un supercondensateur est un élément qui permet de stocker de l'énergie électrique par polarisation d'une solution électrolytique. Lors de la charge ou de la décharge, aucun processus chimique n'est utilisé dans le supercondensateur. Le phénomène est donc tout à fait réversible.

Ainsi, le nombre de cycles qu'il est possible de faire avec des supercondensateurs atteint 500 000 [55]. Ceci est à opposer au cas des batteries qui sont directement liées à un processus chimique et dont le maximum de cycles est de 3 000.

La densité énergétique de ce type de stockeur est faible par rapport aux batteries. Elle est de 5.5 Wh/kg. Par contre, la densité en puissance est beaucoup plus élevée. Elle est de 14 kW/kg. Ces composants sont donc destinés à des applications nécessitant des fortes contraintes en puissance sur de courtes durées [56]. Cette caractéristique se retrouve typiquement dans le domaine des transports où chaque accélération de durée limitée implique une importante contrainte sur l'élément stockeur [57] et donc un échauffement de ce dernier [58] dû à sa résistance interne.

La technologie actuelle permet de fabriquer des supercondensateurs dont leur tension maximale est de 2.7 Volts. Les plus gros éléments qui sont actuellement produits par Maxwell Technologies ont une capacité de 3 000 Farrads. Pour une application dans le domaine des véhicules, plusieurs éléments doivent être connectés en série dans le but d'augmenter la tension du banc stockeur d'énergie. Lorsque plusieurs supercondensateurs sont connectés en série, un système d'équilibrage de la tension de chaque cellule doit être utilisé [59] [60].

Actuellement, un des principaux problèmes pour l'utilisation de supercondensateurs à large échelle est le prix des éléments. Il est néanmoins prévu que le prix baisse dans le futur pour devenir une solution économiquement concurrentielle par rapport aux batteries [61].

Dans de nombreuses applications, un système de stockage composé de supercondensateurs est utilisé conjointement avec un convertisseur continu-continu. Celui-ci est nécessaire car la tension aux bornes du banc n'est pas fixe et varie en fonction de l'état de charge du stockeur. Dans la majorité des applications, la plage de tension exploitée est comprise entre la pleine tension et la moitié de la pleine tension. Dans ce cas, 3/4 de l'énergie stockée dans les supercondensateurs est exploitée.

Une application utilisant un stockeur d'énergie de type supercapacitif est un tramway construit par Bombardier. Ce véhicule est en exploitation avec un service passager depuis 2003 [62] [63]. La figure 3.10 montre une photo de ce tram. Le but de ce stockeur additionnel est double dans ce véhicule. Premièrement, il s'agit de pouvoir parcourir une courte distance en l'absence de caténaires [64]. Ceci peut par exemple



FIG. 3.10 – Photo du tram Bombardier avec le stockeur "Mitrac Energy Saver" ; Source : [62]

être nécessaire lors de travaux sur la ligne, lors de passages dans des régions touristiques ou historiques. La seconde propriété est de diminuer les contraintes sur la caténaire lors des fortes contraintes en puissance dues aux accélérations [65] [66] [67].

Deux bancs de supercondensateurs sont utilisés dans ce véhicule et un de ces bancs est représenté dans la figure 3.11. L'énergie pouvant être stockée dans chaque banc est d'environ 1 kWh pour un poids de 477 kilos et un volume de 0.82 m^3 . L'autonomie de ce véhicule pour un parcours sans caténaire est d'environ 1 km.

Une seconde application utilisant un banc de supercondensateurs comme stockeur d'énergie embarqué est un trolleybus fabriqué par l'entreprise Vossloh Kiepe [68]. Le véhicule construit correspond à un prototype. Le banc de supercondensateurs est placé à l'intérieur du véhicule et ne peut donc pas être exploité pour un service régulier avec des passagers. Le banc de supercondensateurs est composé de 288 éléments de 2 600 Farads, correspondant à un condensateur équivalent de 9 Farads. La tension aux bornes du banc varie entre 350 et 720 Volts, ce qui représente une énergie utile de 515 Wh. Cette même entreprise a également développé un bus diesel-électrique avec un stockeur d'énergie embarqué



FIG. 3.11 – Photo du stockeur d'énergie "Mitrac Energy Saver" ; Source : [62]

de type supercapacitif [69].

SMES

Un SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) est composé d'une inductance, sans circuit ferromagnétique [70]. Dans le but de limiter les pertes internes de ce type de stockeur, le conducteur est de type supraconducteur. La température de fonctionnement est cryogénique [40]. Le système de refroidissement utilisé est très souvent composé d'hélium liquide (4.2°K ou moins) ou d'azote liquide (15 à 30°K).

L'inductance se comporte comme une source de courant continu qui varie en fonction de l'état de charge du SMES. Pour pouvoir exploiter cette énergie, une conversion (DC/DC ou DC/AC) est nécessaire. Les SMES ont une très bonne caractéristique pour répondre à des contraintes en puissance, mais la densité en énergie stockée est faible. Le rendement de ce type de stockeur est élevé : 95% [71].

A cause du besoin en liquide réfrigérant, ce type de stockeur est

difficilement utilisable à bord d'un véhicule.

3.3 Comparaison des différents types de stockeurs

Les différents types de stockeurs qui sont potentiellement utilisables à bord de véhicules ont été décrits dans la section précédente. Une comparaison entre ces différents stockeurs est faite dans cette section. Les stockeurs d'énergie sont classés en fonction de leur type, potentiel ou cinétique.

3.3.1 Durée de vie et rendement du stockeur

Le premier critère retenu consiste à classer les différents stockeurs en fonction de leur durée de vie. Dans ce cas, la durée de vie est exprimée en fonction du nombre de cycles charge-décharge qu'il est possible de leur appliquer. La figure 3.12 présente le nombre de cycles en fonction

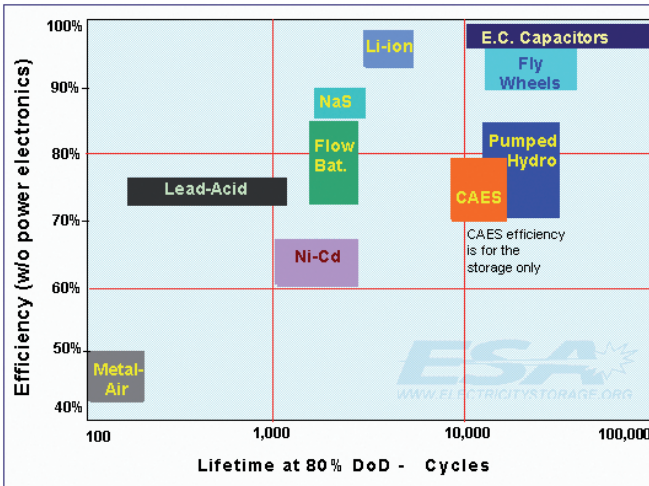


FIG. 3.12 – Nombre de cycles maximaux en fonction du type de stockeur d'énergie ; Source : electricitystorage.org

du rendement du stockeur. Dans ce graphique, le taux de décharge du stockeur est de 80%.

Pour le cas des batteries, le nombre de cycles possible est compris entre 100 et 3 000 en fonction du type de batteries. Le type de batteries ayant la plus grande durée de vie est le Lithium-Ion.

Le nombre maximal de cycles qu'il est possible d'atteindre avec un volant d'inertie est de 100 000 alors qu'il atteint 500 000 pour un stockage à base de supercondensateurs.

En diminuant le taux de décharge, il est possible d'augmenter le nombre de cycles charge-décharge. Ceci se traduit par une diminution de la densité en énergie.

Le rendement est le meilleur pour le cas des supercondensateurs, il est supérieur à 96%. Les batteries de type Lithium-Ion ont un rendement supérieur à 93%. Le rendement des volants d'inertie est un peu plus faible et est supérieur à 89%.

3.3.2 Diagramme de Ragone

Le diagramme de Ragone est utilisé pour caractériser l'énergie qu'il est possible d'extraire d'un stockeur en fonction de la puissance de décharge. Dans les graphiques présentés dans cette section, l'axe des abscisses représente la puissance relative, définie comme étant la puissance divisée par rapport à la puissance maximale du stockeur. L'axe des ordonnées représente l'énergie relative, c'est-à-dire l'énergie qu'il est possible d'extraire en fonction de l'énergie maximale.

Le diagramme de Ragone est directement lié aux pertes internes et d'auto-décharge du stockeur. Pour déterminer le diagramme de Ragone des différents types de stockeurs, la différenciation entre les stockeurs à base d'énergie potentielle et cinétique est faite.

Stockage potentiel d'énergie

Les stockeurs de type potentiel ne comportent pas d'éléments inductifs.

Le premier type de stockeurs d'énergie de type potentiel présenté est la batterie. Elle est considérée comme idéale, c'est-à-dire que la dépendance en fonction de la fréquence et que les non-linéarités intrinsèques ne sont pas prises en compte.

3.3. Comparaison des différents types de stockeurs

L'équation de l'énergie en fonction de la puissance est donnée par [72] en prenant en compte les axes sans unités $e_b = E_b/Q_0 \cdot U_0$ et $p = 4RP/U_0^2$:

$$e_b(p) = \frac{1}{2} \cdot \frac{p}{1 - \sqrt{1-p} + 2R/R_L} \quad (3.2)$$

La figure 3.13 présente le diagramme de Ragone pour une batterie. Le phénomène d'auto-décharge de la batterie n'est pas pris en compte lorsque la résistance parasite de la batterie $R_L = \infty$. Cet effet est pris en compte dans les autres cas.

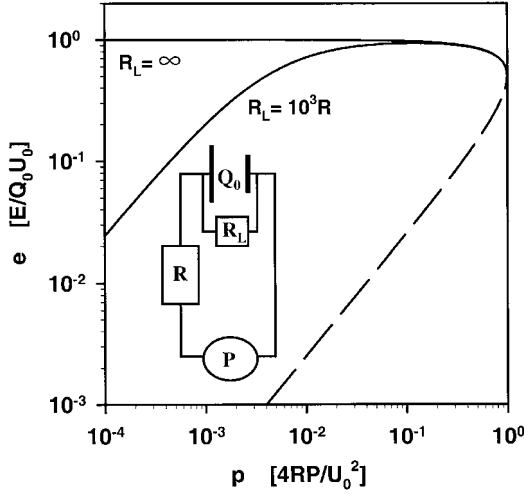


FIG. 3.13 – Diagramme de Ragone pour une batterie ;
Source : [72]

Le deuxième type de stockage de type potentiel présenté dans ce chapitre est le condensateur, l'équation de la courbe de Ragone est donnée dans [72] en prenant en compte les axes sans unités $e_{cap} = 2E_{cap}/CU_{C,0}^2$ et $p = 2RCP/E_0$:

$$e_{cap}(p) = \frac{1}{4} \cdot \left((1 + \sqrt{1-p})^2 - p - p \cdot \ln \left(\frac{(1 + \sqrt{1-p})^2}{p} \right) \right) \quad (3.3)$$

La figure 3.14 représente le diagramme de Ragone pour un condensateur idéal.

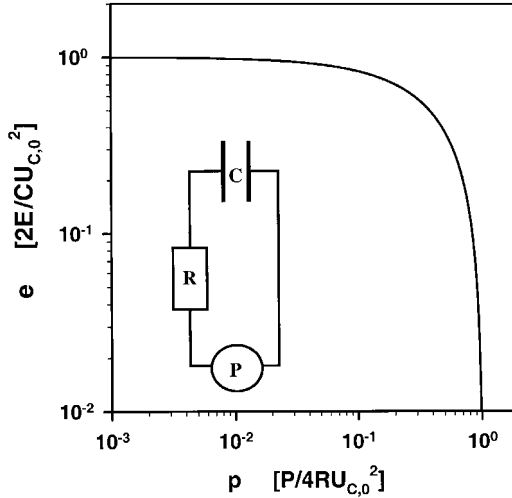


FIG. 3.14 – Diagramme de Ragone pour un condensateur ;
Source : [72]

Stockage cinétique d'énergie

Les stockeurs de type cinétique comportent un terme inductif. En comparaison avec les stockeurs potentiels où les pertes à faible puissance sont dus à l'auto-décharge, les pertes à faible puissance pour les stockeurs cinétiques sont dues aux frottements.

Le cas typique de stockage cinétique est le SMES. Dans ce cas, les forces de frottement sont dues aux résistances internes. La courbe de Ragone est donnée par l'équation [72] :

$$E_i(P) = t_\infty \cdot P = \frac{PL}{2R} \ln \left(1 + \frac{RI_0^2}{P} \right) \quad (3.4)$$

La figure 3.15 présente la courbe de Ragone pour un SMES. Dans ce cas, l'énergie totale est disponible pour des décharges à forte puissance.

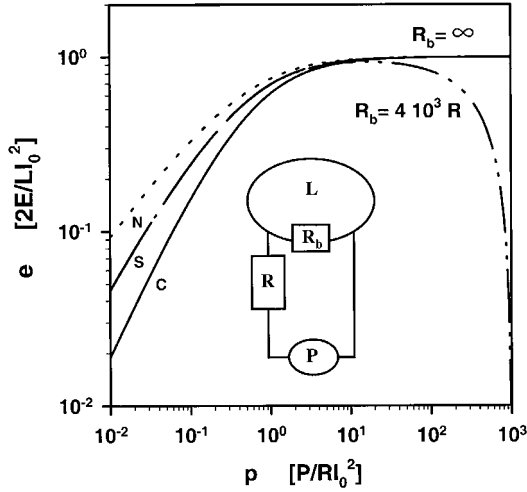


FIG. 3.15 – Diagramme de Ragone pour un SMES ;
Source : [72]

Lors de décharges à faible puissance, une grande part de l'énergie est dissipée dans la résistance.

3.3.3 Plan de Ragone

Le plan de Ragone est utilisé pour caractériser les différents types de stockeurs en fonction de leur densité énergétique et en puissance. Ainsi, sur l'axe des abscisses est représentée la densité en puissance et l'axe des ordonnées représente la densité en puissance. La figure 3.16 montre dans le plan de Ragone les différents stockeurs présentés dans cette section.

La densité en énergie des batteries est d'environ 100 kJ/kg alors que leur densité en puissance est en dessous de 100 W/kg [72]. Dans le cas des supercondensateurs et des volants d'inertie, la densité en puissance est élevée (environ 1 kW/kg) alors que leur densité en énergie est de 1 kJ/kg.

Pour une application dans un véhicule hybride, le choix du type de stockeur s'effectue en étudiant les contraintes en énergie et en puissance

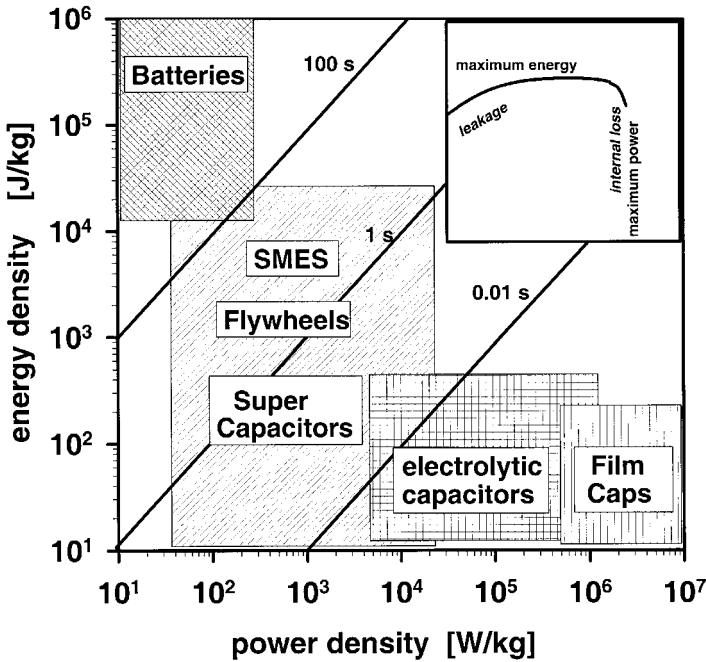


FIG. 3.16 – Plan de Ragone ; Source : [72]

qui sont appliquées au stockeur d'énergie.

Il est ainsi possible de voir que les batteries sont adaptées pour des applications où la constante de temps du stockeur est supérieure à 100 secondes alors que les supercondensateurs et les volants d'inertie sont adaptés à des constantes de temps inférieures à 1 seconde.

3.4 Conclusion

A partir des valeurs données dans ce chapitre, il est dès lors évident que pour un véhicule avec de fortes contraintes en puissance et où le nombre de cycles charge-décharge est important, les stockeurs à base de supercondensateurs ou de volant d'inertie sont les mieux adaptés. Toutefois, la densité énergétique de ces deux types de stockeurs est

bien plus faible que celle des batteries, mais leur plus grande densité en puissance permet de les recharger très rapidement. Ainsi, l'énergie de freinage peut être efficacement récupérée et il est possible de les recharger lors d'un arrêt à une station d'une durée d'environ 20 secondes.

A cause de la complexité concernant la réalisation d'un volant d'inertie tournant à haute vitesse dans un véhicule en mouvement, la solution retenue dans cette thèse est d'utiliser des stockeurs composés de super-condensateurs.

En rapport avec leur plus grande densité en énergie, les batteries offrent une bonne solution pour parcourir de longues distances où les contraintes appliquées sur les batteries sont faibles. La récupération de l'énergie de freinage est directement liée au courant de recharge maximal des batteries et ne permet pas dans la majorité des cas de récupérer de manière optimale la totalité de l'énergie de freinage.

Chapitre 4

Un réseau de transport alimenté par caténaire

4.1 Introduction

Les différentes possibilités pour augmenter le rendement énergétique dans le domaine des véhicules ont été présentées dans les chapitres précédents. Ce chapitre est consacré à étudier la modification de consommation énergétique pour un réseau de transport alimenté par caténaire lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué dans les véhicules. L'exemple d'application retenu dans cette étude est une ligne de tram située en région urbaine, mais le même concept et les mêmes outils de calculs peuvent être appliqués à tout autre réseau de transport à base de caténaire. Dans le domaine ferroviaire, les stratégies qui peuvent être suivies pour augmenter le rendement énergétique des véhicules sont exposées dans [73].

Ce chapitre ne se limite pas à étudier la diminution de la consommation énergétique au niveau d'un véhicule lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance, mais présente une étude complète du système,

c'est-à-dire en incluant les sous-stations, les caténaires et les véhicules. Ainsi, les interactions entre les véhicules sont prises en compte et la consommation du réseau complet est déterminée.

Dans le chapitre 2, il a été montré que la diminution de la consommation lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance embarqué montre un fort intérêt lorsque la distance à parcourir entre deux arrêts est courte. Ce cas se trouve typiquement dans les réseaux de transport urbain, et plus particulièrement pour le réseau de tram qui a été retenu comme exemple d'application dans ce chapitre.

Les transports urbains, notamment les réseaux de trams, construits dans de nombreuses villes entre la fin du XIX^{eme} et le début du XX^{eme} siècle utilisent une alimentation à courant continu et à basse tension, soit entre 600 et 750 V. Chaque réseau était alimenté par des machines rotatives qui ont été remplacées par la suite par des sous-stations à base de pont de diodes. Au cours de l'évolution de ces réseaux, le matériel roulant a été modifié : le poids, les propriétés dynamiques et la vitesse moyenne ont été augmentés. Ceci se traduit par une augmentation des contraintes en puissance appliquées sur la caténaire et des chutes de tension sont observées sur la ligne de contact.

Lors des freinages avec des véhicules récents, les moteurs de traction peuvent être utilisés en mode génératrice. L'énergie ainsi produite est soit réinjectée sur la caténaire, soit dissipée dans un chopper de freinage sous forme de chaleur. Les conditions requises pour réinjecter la puissance de freinage de manière optimale sur la caténaire ne sont que rarement réunies simultanément. Il est notamment nécessaire qu'un autre véhicule consommateur de puissance se trouve à proximité de celui qui freine, que la résistance de ligne soit faible et que le niveau de tension maximal de la ligne ne soit pas atteint. En effet, la dissipation d'énergie dans la caténaire est directement dépendante de sa résistance linéique et le fait de réinjecter de la puissance localement sur la ligne par un véhicule élève le niveau de tension à cet endroit. Dans la pratique, l'énergie qui est réinjectée correspond à moins de 50 % de l'énergie qui pourrait être récupérée.

Ce chapitre étudie les propriétés d'un réseau de véhicules alimentés par caténaire lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance dans les véhicules. Dans ce cas, l'énergie ne pouvant pas être réinjectée de manière efficace sur la caténaire est stockée à bord du véhicule. Cette énergie est alors utilisée pour diminuer les contraintes en puissance ap-

pliquées sur la caténaire lors des accélérations suivantes. En plus d'augmenter le rendement énergétique au niveau du véhicule, l'ajout d'un système de stockage embarqué présente les avantages suivants [74] :

- Augmentation du rendement énergétique du système complet comprenant les sous-stations, les caténaires et les véhicules tout en conservant les mêmes caractéristiques dynamiques des véhicules. La diminution des contraintes de puissance prélevée sur la caténaire lors des accélérations permet de réduire le courant circulant dans les caténaires et le courant délivré par les sous-stations. La puissance dissipée dans ces deux éléments est réduite, car les pertes ohmiques sont proportionnelles au carré du courant.
- Possibilité d'exploiter le véhicule sur un court parcours sans caténaire. Dans ce cas, l'énergie nécessaire pour la traction est prélevée dans le stockeur embarqué. Ainsi, l'impact sur le paysage dû aux caténaires peut être réduit dans certaines zones, notamment autour de lieux touristiques, historiques, etc.
- Augmentation des propriétés dynamiques du véhicule et en particulier l'accélération. Dans de nombreux cas, les propriétés dynamiques du véhicule sont directement liées à la puissance pouvant être prélevée à la caténaire : lorsque la tension de ligne chute en dessous d'une valeur limite, la puissance de traction doit être réduite. Pour un véhicule ayant un système d'assistance en puissance, la puissance du moteur traction est fournie conjointement par le stockeur d'énergie embarqué et la caténaire.
- Possibilité d'augmenter le nombre de véhicules sur la ligne. Dans ce cas, la distance entre chaque véhicule peut être réduite sans changer l'infrastructure fixe des sous-stations et des caténaires. La diminution des contraintes en puissance appliquées au réseau par chaque véhicule permet cet ajout de véhicules.

Le gain sur la consommation d'énergie du réseau de transport lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance embarqué dans les véhicules est directement dépendant d'une multitude de facteurs, tels que la résistance linéique des caténaires, l'emplacement des sous-stations, le poids à vide des véhicules, la puissance utilisée par les auxiliaires dans les véhicules. Une étude concernant la manière dont ces différents paramètres influencent la consommation énergétique du réseau de transport

est présentée à la fin de ce chapitre.

4.2 Définition d'un parcours de référence

Les caractéristiques d'un parcours de référence sont définies dans cette section. Cette ligne sert de base à tous les calculs qui sont présentés dans la suite de ce chapitre.

Le parcours retenu se situe sur la ligne 1 des transports publics de la ville de Mannheim. Sur cette ligne, seule la section se situant entre la station "Neckarauer Übergang" et le terminus "Rheinau Bahnhof" est prise en compte. La figure 4.1 présente la section retenue ¹.

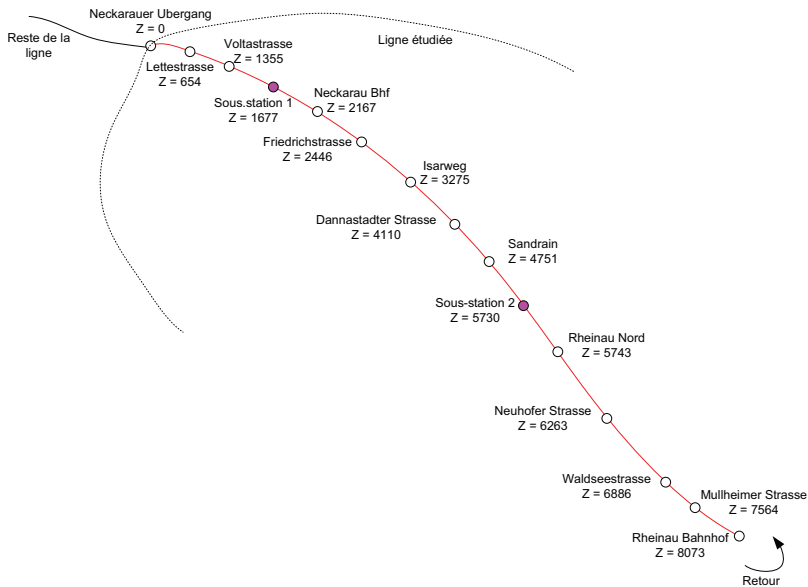


FIG. 4.1 – Plan de la ligne retenue

Ce parcours correspond à une ligne qui est actuellement exploitée par des véhicules standards alimentés par caténaire. Les résultats présentés

¹Pour plus de détails sur le parcours retenu, se référer à : www.vrn.de

dans ce chapitre sont valables seulement pour cette ligne, mais la même méthode de calcul peut être appliquée à toute autre ligne.

Cette section est composée de treize stations et de deux sous-stations. La position de chaque station par rapport au début de la ligne correspondant à la station "Neckarauer Übergang" ainsi que celle des sous-stations est donnée dans la figure 4.1. Le parcours de référence retenu a une longueur d'environ 8 km, une faible dénivellation (figure 4.2) et ne comporte pas de tunnels. Les courbes sur le parcours sont données dans la figure 4.3 et la vitesse est représentée dans la figure 4.4. La distance moyenne entre chaque station est de 620 mètres. Les contraintes appliquées sur le système d'alimentation par chaque véhicule sont élevées et sont dues aux nombreuses phases d'accélération - freinage. Dans ce type de réseau de transport, toute la durée de l'accélération et du freinage est effectuée en imposant le couple maximal aux moteurs de traction, sauf si une autre limitation doit être prise en compte. La distance entre chaque station est faible, les tronçons où le véhicule circule à vitesse constante sont donc courts par rapport à la distance nécessaire pour accélérer et freiner. Cette caractéristique est typique de l'exploita-

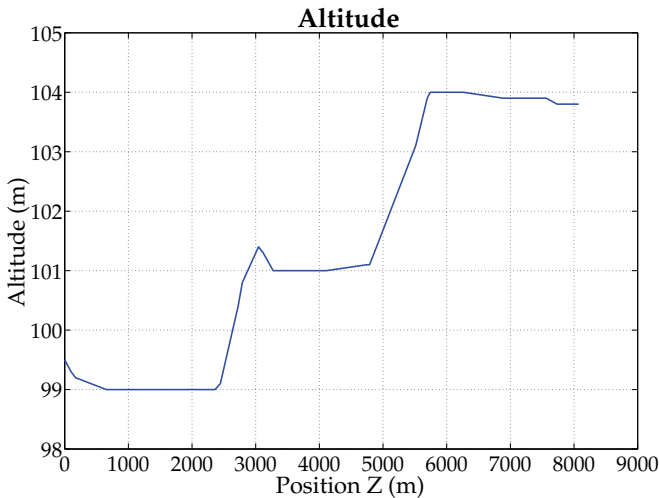


FIG. 4.2 – Altitude sur le parcours en fonction de la position

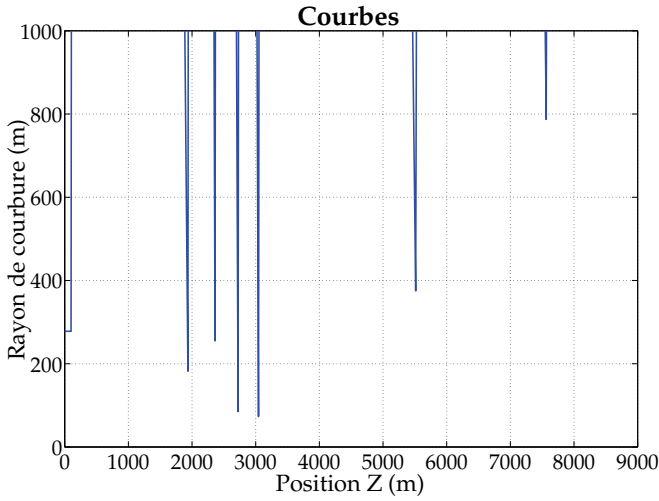


FIG. 4.3 – Courbes sur le parcours en fonction de la position

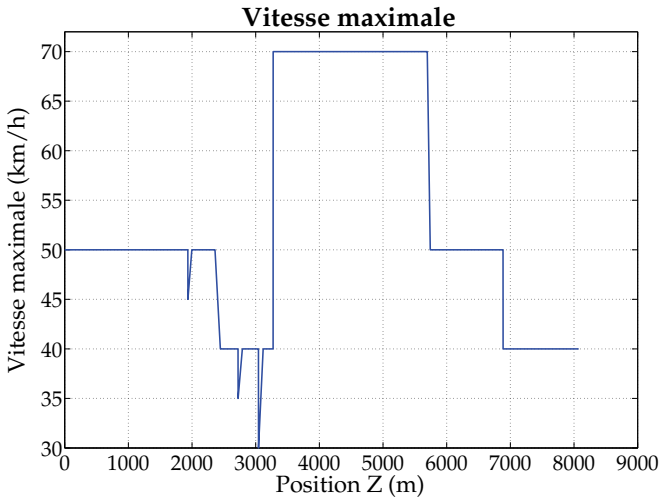


FIG. 4.4 – Vitesse maximale du véhicule sur le parcours en fonction de la position

tion de véhicules en milieu urbain.

La vitesse maximale des véhicules sur le parcours est de 70 km/h. En fonction des caractéristiques du parcours, cette vitesse maximale est limitée sur certains tronçons. La vitesse maximale en fonction de la position est représentée dans la figure 4.4.

4.3 Caractéristiques du véhicule de référence

Le matériel roulant utilisé sur le parcours de référence est fabriqué par la société Bombardier, Allemagne. Le modèle de véhicule 6MGT est exploité et il correspond à un véhicule de 29.2 mètres de longueur comportant 4 articulations et 3 bogies. Les caractéristiques détaillées sont données dans le tableau 4.1 et la figure 4.5 en montre une photo. Ce véhicule sert de référence lors des calculs présentés dans la suite de ce chapitre.

Le véhicule est propulsé par 4 moteurs électriques de 95 kW chacun. Cette puissance permet d'atteindre une accélération maximale de 1.2 m/s^2 . Lors des freinages, l'accélération du véhicule atteint -1.3 m/s^2 .

La figure 4.6 présente le schéma des flux d'énergie à bord de ce véhicule. La source d'énergie primaire est la caténaire dont la tension nominale est de 820 V. L'énergie prélevée transite ensuite au travers des éléments de protection qui sont utilisés en cas de défaillance du véhicule ou du réseau d'alimentation. Le bus de tension continue du véhicule alimente ensuite 4 convertisseurs statiques. Chacun de ces convertisseurs alimente un des moteurs de traction de 95 kW. La puissance utilisée par les moteurs de traction est directement prélevée à la caténaire, sans tampon. Les contraintes en puissance sont donc directement répercutées sur le réseau d'alimentation. En effet, il n'y a pas de système de stockage d'énergie à bord du véhicule pour pouvoir limiter ces contraintes. Lors des freinages, les moteurs électriques de traction fonctionnent en mode génératrice et transforment l'énergie cinétique du véhicule en énergie électrique. L'énergie ainsi produite est soit réinjectée sur la caténaire, soit dissipée sous forme de chaleur dans des résistances de freinage. La part d'énergie réinjectée dépend de l'état de réceptivité de la caténaire.

Bien que le véhicule permette de réinjecter l'énergie de freinage dans la caténaire, en pratique moins de 50 % de l'énergie de freinage potentiel-

4.3. Caractéristiques du véhicule de référence

Mécanique :	
Ecartement des voies :	1 000 mm
Type de véhicule :	6MGT
Hauteur du plancher :	Bas : 350 mm Haut : 600 mm
Dimensions du véhicule :	Longueur : 29 200 mm Largeur : 2 400 mm Hauteur : 3 400 mm
Poids total à vide :	35.8 t
Poids total en charge :	50.3 t
Capacité :	
Nombre de places assises :	85
Nombre de places debout :	97 (4 personnes par m ²)
Nombre total de places :	182
Dynamique :	
Puissance des moteurs de traction :	380 kW (4 x 95 kW)
Force maximale fournie :	60 kN
Accélération maximale accélération/freinage :	1.2/1.3 m/s ²
Vitesse maximale :	70 km/h
Force de freinage max des freins électriques :	60 kN

TAB. 4.1 – Caractéristiques du véhicule 6MGT



FIG. 4.5 – Photo du véhicule 6MGT ; Source : www.cyclura.cz

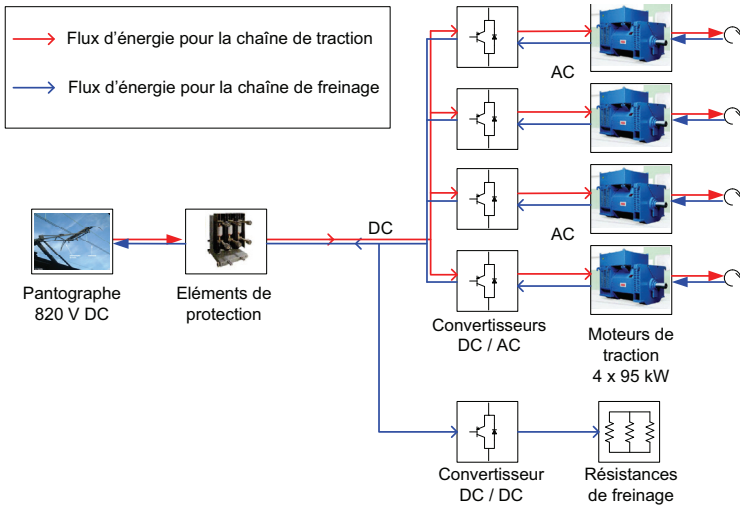


FIG. 4.6 – Flux d'énergie à bord du véhicule 6MGT

lement exploitable est utilisée. Ceci est principalement dû à l'absence de système de stockage d'énergie pouvant absorber cette énergie. Dans ce type de réseau, la plus grande part des pertes énergétiques est due à la dissipation de l'énergie de freinage des véhicule car tous les autres éléments utilisés dans la chaîne énergétique ont un rendement élevé. La suite de ce chapitre présente un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué dans les véhicules pour augmenter le rendement énergétique du réseau de transport complet.

4.4 Système d'assistance en puissance proposé

La figure 4.7 représente le schéma bloc d'un véhicule alimenté par caténaire standard. Une structure de ce type se retrouve dans le véhicule 6MGT utilisé sur la ligne de référence. Ce système ne permet pas de récupérer de manière optimale l'énergie de freinage. En effet, une partie de cette énergie est réinjectée sur la caténaire et le reste est directement

4.4. Système d'assistance en puissance proposé

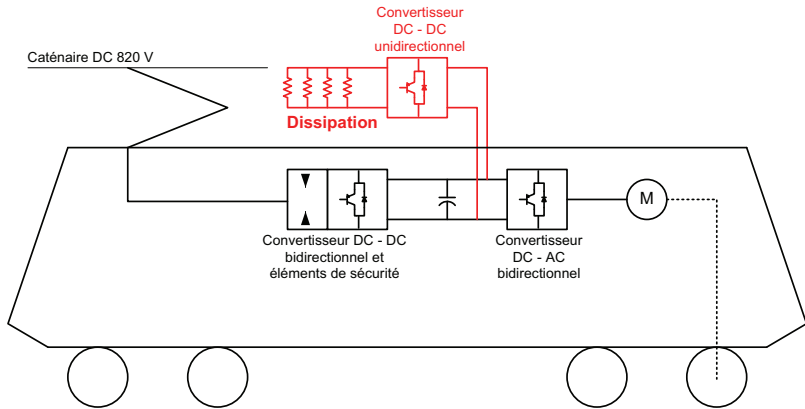


FIG. 4.7 – Schéma structurel d'un véhicule standard alimenté par caténaire

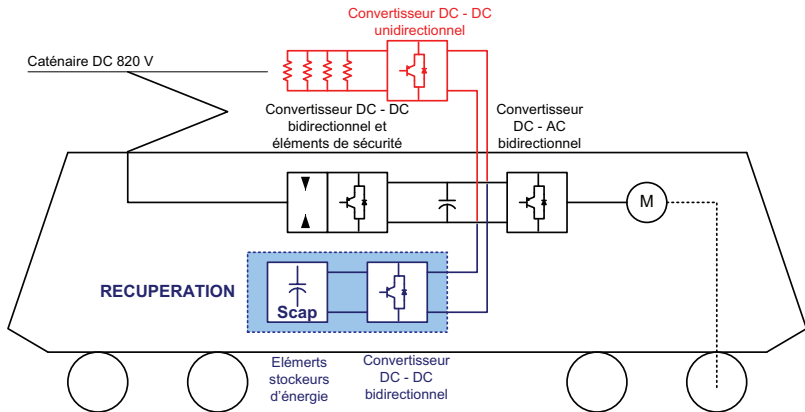


FIG. 4.8 – Schéma structurel d'un véhicule alimenté par caténaire avec un système d'assistance en puissance

dissipé sous forme thermique dans des résistances de freinage placées sur le toit. Dans la pratique, moins de 50 % de l'énergie qui pourrait être récupérée est exploitée. Lors des accélérations, les contraintes en puissance des moteurs de traction se répercutent directement sur la caténaire. Due aux forts pics de puissance prélevés lors des accélérations, une chute de tension se produit au niveau de la caténaire. Elle est fonction de la résistance linéique de la ligne et ainsi, plus le courant qui y circule est important, plus la chute de tension est élevée. Cette chute de tension n'a pas seulement une influence au niveau du fonctionnement du véhicule se traduisant par une diminution de la force d'accélération en cas de chute de tension trop importante, mais est aussi associée à une perte d'énergie due aux pertes joules sur la ligne.

Dans le but d'augmenter le rendement total du réseau de transport, un système d'assistance avec un stockeur d'énergie embarqué dans les véhicules est défini dans la figure 4.8. Dans ce véhicule, les résistances de freinage ne peuvent pas être supprimées pour des questions de sécurité. En effet, lorsque le stockeur d'énergie additionnel est complètement chargé, le véhicule doit toujours pouvoir exploiter les freins électriques et dissiper cette énergie. Le système d'assistance en puissance apporte les avantages suivants au niveau énergétique :

- Récupération optimale de l'énergie de freinage. Dans ce cas, la totalité de l'énergie de freinage peut être récupérée. Une partie de cette énergie est toujours réinjectée sur la caténaire et le reste est stocké à bord du véhicule. Dans une réalisation pratique, le chopper de freinage ne peut pas être supprimé car le véhicule doit conserver les mêmes caractéristiques lors des freinages même si le système de stockage est complètement chargé.
- Diminution des pertes sur les caténaires. Le système de stockage embarqué et la caténaire sont utilisés pour fournir les fortes contraintes en puissance dues aux moteurs de traction. Le courant circulant dans les caténaires est donc diminué, ce qui réduit les pertes ohmiques associées. Ces pertes sont proportionnelles au carré du courant.
- Diminution des pertes dans les sous-stations. Les pertes internes dans les sous-stations sont une image du courant délivré aux caténaires. Une diminution de ce courant implique une réduction de ces pertes.

En plus d'augmenter le rendement énergétique du réseau de trans-

port, l'ajout d'un système de stockage d'énergie embarqué dans les véhicules a également d'autres avantages. Il est, par exemple, possible de parcourir une courte distance avec le véhicule où la construction de caténaires n'est pas voulue, notamment pour des questions d'impact sur le paysage aux abords de monuments historiques. Le second avantage lié à l'ajout d'un système de stockage embarqué est de pouvoir libérer la chaussée ou le carrefour en cas de défaillance du système d'alimentation par caténaire. Ainsi, des embouteillages peuvent être évités dans les centres villes.

Comme les contraintes en puissance appliquées à la caténaire sont diminuées par l'ajout d'un système d'assistance en puissance, il est possible, sans modifier l'infrastructure fixe des sous-stations et des caténaires, d'augmenter les caractéristiques dynamiques des véhicules, d'utiliser des véhicules avec une masse utile plus importante ou de diminuer la distance entre chaque véhicule. Le gain de confort pour les utilisateurs est alors important.

Suite au système d'assistance en puissance proposé dans cette section, les contraintes en puissance appliquées sur le stockeur d'énergie sont importantes. Un stockeur ayant une durée de vie suffisante et une densité en puissance importante doit être choisi. Suite au chapitre 3, un stockeur de type supercapacitif est retenu.

4.4.1 Structure du branchement du stockeur d'énergie dans le véhicule

L'ajout du système de stockage d'énergie à bord du véhicule peut être effectué selon deux configurations distinctes : par un branchement série ou un branchement parallèle par rapport au flux d'énergie principal. Le schéma du véhicule de référence est donné dans la figure 4.9. Les deux figures 4.10 et 4.11 représentent les deux configurations possibles.

Branchement série du banc stockeur d'énergie

Un branchement série du stockeur d'énergie par rapport au flux d'énergie principal dans la véhicule est représenté dans la figure 4.9. Cette configuration nécessite l'utilisation de 3 convertisseurs statiques en série entre la caténaire et le moteur de traction alors que le cas standard d'un véhicule alimenté par caténaire en nécessite un seul. L'énergie

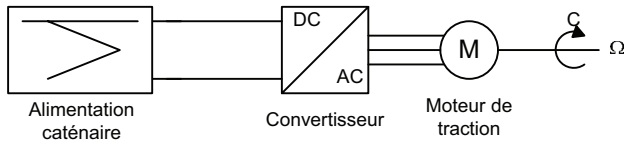


FIG. 4.9 – Structure actuelle du véhicule

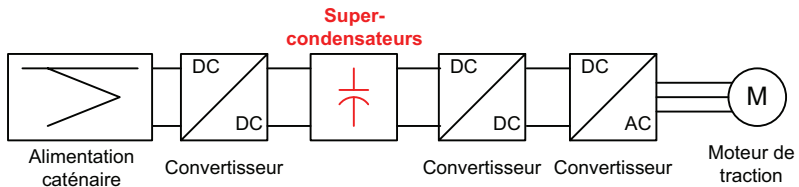


FIG. 4.10 – Structure du véhicule avec un stockeur série

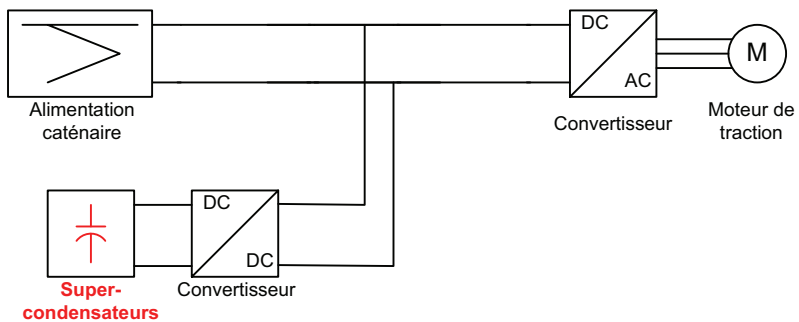


FIG. 4.11 – Structure du véhicule avec stockeur parallèle

principale prélevée sur la caténaire doit donc transiter au travers de ces trois convertisseurs et le rendement énergétique de chaque véhicule est directement lié au rendement de ces 3 convertisseurs.

Le premier convertisseur statique est utilisé pour interfacer le stockeur d'énergie, dans ce cas un banc de supercondensateurs dont sa tension est variable en fonction de son état de charge, à la caténaire dont la tension nominale est de 820 V. Le deuxième convertisseur est utilisé pour adapter le niveau de tension entre le stockeur d'énergie et le bus à tension continue et le troisième pour alimenter le moteur de traction. Dans certains cas, il est possible de réaliser un seul convertisseur statique qui remplace les deux derniers.

L'énergie de freinage est récupérée en faisant fonctionner le moteur de traction en mode génératrice et cette énergie est stockée dans le banc stockeur en circulant au travers de deux convertisseurs statiques.

En plus de la question du rendement faible à cause de la cascade des différents convertisseurs, cette solution a aussi le désavantage d'avoir une faible robustesse face à une défaillance du système de stockage. En effet, dans ce cas, le véhicule est immobilisé car toute l'énergie de traction doit transiter aux bornes du stockeur d'énergie.

Branchement parallèle du banc stockeur d'énergie

L'utilisation d'un branchement parallèle du banc stockeur d'énergie est représentée dans la figure 4.11. Cette structure nécessite l'utilisation de seulement 2 convertisseurs statiques. Le premier convertisseur, pour alimenter le moteur de traction, est identique à celui d'un véhicule standard. Le second convertisseur est branché au bus de tension continue et est utilisé pour interfacer le niveau de tension du banc stockeur, dont la tension est variable, au bus à tension continue qui a une tension nominale de 820 V. Il sert également à gérer les flux énergétiques à bord du véhicule.

Avec cette configuration, l'énergie principale prélevée sur la caténaire transite seulement au travers d'un seul convertisseur de manière identique à un véhicule standard. Le rendement du système est plus élevé que dans le cas d'un branchement série où toute l'énergie doit transiter au travers de 3 convertisseurs statiques.

L'énergie de freinage est récupérée en faisant fonctionner les moteurs de traction en mode génératrice. Cette énergie traverse les deux conver-

tisseurs et est stockée. Le convertisseur associé au stockeur est ensuite utilisé pour réinjecter l'énergie stockée dans le système de traction lors des accélérations suivantes.

Ce type de branchement offre une meilleure robustesse qu'un branchement série en cas de défaillance du système de stockage d'énergie. Dans ce cas, le stockeur est dissocié de la chaîne de traction à l'aide de son convertisseur associé et l'énergie nécessaire à la traction est alors directement prélevée sur la caténaire.

Choix retenu

Le choix retenu dans ce chapitre pour le système d'assistance en puissance dans un véhicule alimenté par caténaire consiste à brancher le système de stockage d'énergie selon une configuration parallèle. Cette solution est choisie à cause du rendement plus élevé du système final et de la robustesse plus importante en cas de défaillance du système de stockage d'énergie.

4.4.2 Régulation du système d'assistance en puissance

Cette section présente le système de régulation d'énergie retenu pour le véhicule à assistance en puissance. Chaque phase entre deux arrêts à une station est séparée en quatre étapes pour la régulation de l'énergie : l'accélération, le parcours à vitesse constante, le freinage et l'arrêt à une station.

Pour la première phase, l'accélération, la puissance délivrée par le banc stockeur d'énergie est donnée par :

$$P_{sc} = \{A_{sc} \cdot v^2 + B_{sc} \cdot v + C_{sc}\} \cdot a \quad (4.1)$$

Ainsi, la puissance délivrée par le stockeur d'énergie lors des accélérations dépend de la valeur instantanée de l'accélération a et de la vitesse v . Les coefficients A_{sc} , B_{sc} et C_{sc} sont déterminés en fonction de la taille du stockeur d'énergie, du type de véhicule et du parcours. Une protection désactivant le système d'assistance en puissance dans le cas où le stockeur d'énergie est déchargé est incluse dans le système de régulation.

La seconde phase correspond au moment où le véhicule avance à vitesse constante. Dans ce cas, la puissance nécessaire pour les moteurs de traction est faible et les variations de puissance le sont aussi. La totalité de la puissance de traction est directement prélevée sur la caténaire et non sur le stockeur.

Lors de la phase de freinage, la gestion de la puissance qui peut être réinjectée sur la caténaire est identique au cas où le véhicule ne possède pas de stockeur d'énergie. Le solde de la puissance de freinage est utilisé pour recharger le banc stockeur. Durant toute la phase de freinage, une limite concernant le courant maximal de recharge du stockeur d'énergie est introduite dans le système de régulation. Dès que le stockeur est complètement chargé, la puissance qui n'est pas réinjectée dans la caténaire est dissipée.

Lors de l'arrêt du véhicule à une station et lorsque le stockeur est complètement chargé, la puissance aux bornes du stockeur est nulle. Dans le cas où l'énergie récupérée lors du freinage précédent n'est pas suffisante pour une recharge complète du stockeur, une puissance est prélevée sur la caténaire pour terminer la charge lors de l'arrêt :

$$P_{sc} = 0.5 \cdot C_{scap} \cdot (U_{sc_{max}}^2 - U_{sc}^2) / t_{scrch} \quad (4.2)$$

Dans ce cas, la puissance de recharge est calculée en fonction de la tension aux bornes du banc de supercondensateurs $U_{sc_{max}}$ au moment où le véhicule s'arrête, de la tension de pleine charge du banc U_{sc} , de la valeur équivalente du condensateur C_{scap} et du temps pour effectuer la fin de la recharge t_{scrch} .

4.5 Simulateur de réseau de transport à caténaire

Cette section présente la réalisation d'un simulateur de réseau de transport à caténaire qui est développé dans le but de déterminer les avantages sur la consommation énergétique lorsque un système d'assistance en puissance est ajouté dans les véhicules. Le but de ce chapitre consistant à étudier le système complet de véhicules alimentés par caténaire, le simulateur prend en compte la totalité du réseau de transport.

Il comprend donc les éléments suivants : véhicules – caténaires – sous-stations.

La part de l'énergie de freinage qui est réinjectée sur la caténaire est directement dépendante de l'état de réceptivité de la ligne lorsque le véhicule freine. Le simulateur modélise donc les interactions qui existent du point de vue énergétique entre différents véhicules connectés sur une caténaire commune.

Le simulateur développé est réalisé pour le parcours et les véhicules qui servent de référence dans ce chapitre. Il est toutefois aussi développé dans le but de pouvoir être utilisé pour d'autres réseaux et pour d'autres types de véhicules. Il peut également modéliser différents types de véhicules circulant sur la même ligne. Il peut être utilisé pour un réseau de trams comme présenté dans ce chapitre, mais aussi pour des réseaux de transport souterrains, par exemple un métro, ou pour un réseau sur pneus, par exemple un trolleybus.

Les données qui sont nécessaires pour utiliser ce simulateur correspondent aux caractéristiques mécaniques et électriques des véhicules, aux caractéristiques de la caténaire, principalement sa résistance linéique, et aux caractéristiques des sous-stations : tension nominale, courant maximal et résistance parasite.

4.5.1 Structure du simulateur

Le simulateur développé dans ce chapitre se base sur le programme Matlab-Simulink ² [75]. Il est réalisé dans le but de pouvoir être utilisé sur toute version de Matlab ultérieure et sur toutes les plateformes actuelles, telles que Windows, Linux ou Mac OS X.

La structure de base du simulateur est représentée dans la figure 4.12. Elle est composée des trois blocs suivants : véhicules, sous-stations et calcul de la tension de ligne. Les données de base pour le calcul de la tension de ligne correspondent aux vecteurs position et puissance de tous les composants connectés à la caténaire, c'est-à-dire les véhicules et les sous-stations. La structure du logiciel de simulation est composée de plusieurs fichiers distincts :

- Fichiers Matlab ".m" pour charger toutes les variables et données nécessaires au simulateur.

²La version de Matlab utilisée est la version R2007b

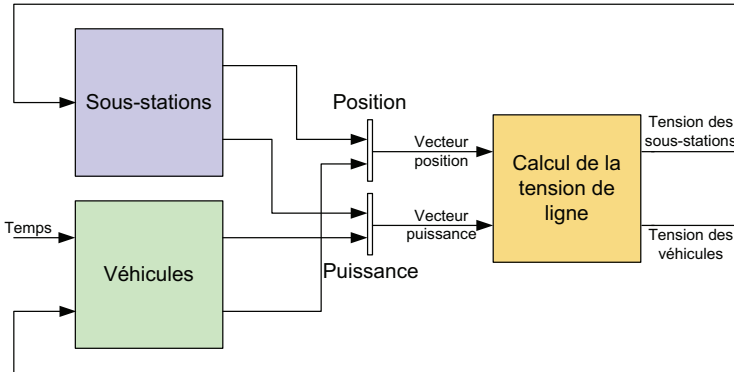


FIG. 4.12 – Structure du simulateur

- Fichiers "S-function", fichiers de code C, pour l'ajout de blocs à la librairie Simulink déjà existante [76].
- Schémas Simulink, ces fichiers correspondent à la base du simulateur.
- Fenêtres graphiques pour introduire les paramètres nécessaires au simulateur et pour traiter les résultats obtenus à la fin de la simulation. L'annexe B présente ces différentes interfaces graphiques.

L'utilisation de "S-fonctions" spécialement développées pour ce simulateur est faite dans le but de diminuer le temps de calcul. Ainsi, le temps pour obtenir les résultats sur la ligne de référence, pour une simulation d'une durée de 3000 secondes, comportant un véhicule et deux sous-stations, avec un ordinateur standard (Pentium 4, 3.2 Ghz), est d'environ 10 minutes.

La section suivante présente les modèles retenus pour la réalisation du simulateur. Les modèles mécaniques du véhicule et électriques du véhicule, des lignes de contact et des sous-stations vont être présentés.

4.5.2 Modèles mécaniques du véhicule

Equations mécaniques générales

Un véhicule sur une ligne est représenté dans la figure 4.13. Dans cette figure, le véhicule est modélisé comme un point mobile qui peut se

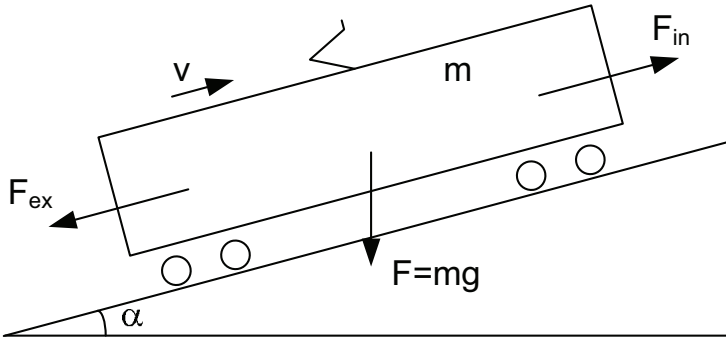


FIG. 4.13 – Bilan des forces pour le véhicule

déplacer selon un degré de liberté. Les forces appliquées sur le véhicule se divisent en deux catégories distinctes : F_{in} produites par le véhicule, positives lors des accélérations et négatives lors des freinages, et F_{ex} dues à l'environnement extérieur du véhicule qui s'opposent à l'avancement du véhicule dans la majorité des cas.

Suite à ces considérations, il est possible d'appliquer la relation de Newton :

$$F_{in} - F_{ex} = m^* \cdot a \quad (4.3)$$

Dans cette équation, la masse usuelle est remplacée par la masse corrigée m^* . Elle représente la masse du véhicule avec une correction due aux masses qui sont en rotation dans le véhicule. Le facteur de correction est ζ et la relation entre la masse et la masse corrigée est donnée par : $m^* = \zeta \cdot m$. Le facteur ζ est compris dans une plage de valeur entre 1.02 et 3.5 et est dépendant de chaque type de véhicule. Le tableau 4.2 donne la valeur du coefficient ζ pour différents types de véhicules.

Les forces dues à l'environnement extérieur du véhicule sont données dans l'équation :

$$F_{ex} = F_f + F_a + F_d + F_c + F_g \quad (4.4)$$

- F_{ex} : forces extérieures appliquées sur le véhicule
- F_f : force de frottement due à la friction dans l'air

Type de véhicule	Type d'entraînement	ζ (-)
Train complet	Adhérence	1.06 - 1.10
Voitures et wagons	Adhérence	1.02 - 1.04
Automotrices	Adhérence	1.08 - 1.14
Locomotives	Adhérence	1.15 - 1.30
Voitures	Crémaillère	1.05 - 1.10
Automotrices	Crémaillère	1.30 - 2.50
Locomotives	Crémaillère	1.50 - 3.50

TAB. 4.2 – Tableau des coefficients ζ ; Source : [37]

- F_a : force d'arrachement. Elle correspond à la force minimale qui doit être appliquée au véhicule pour le mettre en mouvement
- F_d : force due à la déclivité
- F_c : force due aux courbes
- F_g : force de frottement due aux tunnels

Les paragraphes suivants présentent les modèles retenus pour le calcul de chacune de ces forces.

Force de frottement due à l'air

Les forces de frottement dues à la friction dans l'air sont directement liées aux propriétés du véhicule (par exemple la géométrie,...). Les frottements dus à l'air ont une caractéristique du second ordre par rapport à la vitesse. L'équation suivante présente la forme de la courbe retenue pour le simulateur :

$$F_f = A_f \cdot v^2 + B_f \cdot v + C_f \quad (4.5)$$

La caractéristique pour déterminer cette force de frottement dépend donc de trois constantes. La première A_f correspond au terme proportionnel au carré de la vitesse, la seconde B_f correspond au terme proportionnel à la vitesse et la troisième C_f correspond à une constante. Dans cette équation, la vitesse v est donnée en m/s et la force de frottement F_f en Newton.

Ces trois constantes sont déterminées soit par mesure sur un véhicule, soit par des méthodes de calculs dédiées. Ces différentes méthodes sont présentées dans [37].

Force d'arrachement du véhicule

La force d'arrachement F_a correspond à la force qui doit être appliquée à la roue du véhicule pour pouvoir commencer à le faire démarrer. Une fois que le véhicule a démarré, cette force d'arrachement est nulle. La relation suivante définit la force d'arrachement :

$$F_a = \begin{cases} 7.5 \cdot 10^{-3} \cdot m \cdot g & \text{si } V \approx 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.6)$$

Dans cette relation, la force d'arrachement F_a est exprimée en Newton quand la masse m est donnée en kilos et que g correspond à la constante de gravitation.

Pour le simulateur développé dans ce chapitre, cette force d'arrachement est considérée comme nulle. Ceci est fait car elle est négligeable par rapport aux autres forces appliquées sur le véhicule et elle intervient que pendant un court temps lors de chaque démarrage. Cette hypothèse n'a donc pas d'influence sur les résultats des simulations.

Force due à la déclivité

La formule suivante décrit le comportement du véhicule face à une contrainte sur la déclivité :

$$F_d = \sin(\alpha) \cdot m \cdot g \quad (4.7)$$

Dans cette équation, α correspond à l'angle tel que défini dans la figure 4.13, m est la masse en kg , g est le coefficient de la gravité (m/s^2) et la force due à la déclivité F_d est exprimée en Newton. Dans le cas où l'angle α est petit, il est possible de confondre le sinus et la tangente. Ceci peut être généralement fait pour des pentes inférieures à 120‰. Dans ce cas, la force F_d devient :

$$F_d = i \cdot 10^{-3} \cdot m \cdot g \quad (4.8)$$

Dans cette équation, i correspond à la pente exprimée en pour mille. La figure 4.2 représente la courbe de la pente sur le parcours de référence retenu dans ce chapitre.

Force due aux courbes

La force de frottement due aux courbes a été déterminée dans de nombreux cas suite à des mesures prenant en compte différents types de véhicules ainsi que différentes configurations pour l'écartement des voies. Cette force est dépendante de la distance entre les deux rails, du rayon de courbure R_v , du poids m et de la gravité g . La formule est la suivante :

$$F_c = \frac{k_e}{R_v} \cdot 10^{-3} \cdot m \cdot g \quad (4.9)$$

Dans ce cas, la force de frottement F_c est donnée en Newton, le rayon de courbure R_v en mètres, la masse m en kilos et le coefficient k_e dépend de l'écartement des rails. La valeur de ce coefficient est donnée dans le tableau 4.3.

Distance entre les rails [mm]	k_e [m]
1435	750
1000	530
750	400
600	325

TAB. 4.3 – Coefficient k_e en fonction de l'écartement entre les rails ; Source : [37]

Le graphique représentant les courbes pour le parcours de référence est donné dans la figure 4.3. Pour garantir la stabilité du simulateur, une section droite est représentée comme ayant un rayon de courbure de 10 kilomètres. Cette hypothèse n'a pas d'influence sur le résultat de la consommation énergétique du véhicule.

Force due au passage dans un tunnel

Le passage au travers d'un tunnel augmente la part des forces de frottement aérodynamiques dues à l'air. La relation est la suivante :

$$F_g = k_t \cdot A_f \cdot v^2 \quad (4.10)$$

La force de frottement due aux tunnels est ajoutée à la force de frottement dans l'air libre. Le coefficient k_t correspond à un facteur

dépendant de la géométrie du tunnel et est principalement lié à son diamètre. La valeur de ce facteur est donnée dans le tableau 4.4 pour des tunnels de forme standard. Le second coefficient A_f correspond au même coefficient que pour le calcul de la résistance d'avancement à l'air libre et correspond au coefficient proportionnel au carré de la vitesse. Ainsi, la force de frottement additionnelle due à un passage dans un tunnel dépend directement du carré de la vitesse.

Type de tunnel	k_t [-]
Voie unique	2
Double voie	1
Hors du tunnel	0

TAB. 4.4 – Coefficient k_t en fonction du type de tunnel

Le parcours de référence retenu dans ce chapitre ne présente pas de passage dans des tunnels. Le coefficient k_t est donc de 0 pour toutes les simulations présentées.

Transmission mécanique entre le moteur et les roues

La figure 4.14 représente le diagramme structurel utilisé pour le calcul de la puissance électrique à partir de la vitesse et de la force appliquée aux roues. La figure 4.15 représente la schématique utilisée pour implémenter ce calcul dans le simulateur. A partir de la vitesse du véhicule et de la force appliquée, il est possible de déterminer la vitesse de rotation des roues ω_e et le couple au niveau des roues M_e :

$$\omega_e = \frac{v}{R_e} \quad (4.11)$$

$$M_e = F_{in} \cdot R_e \quad (4.12)$$

La vitesse de rotation du moteur ω_m , le couple du moteur M_m et la puissance des moteurs P_{mo} sont définis comme suit :

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{k_g} \quad (4.13)$$

$$M_m = M_e \cdot k_g \quad (4.14)$$

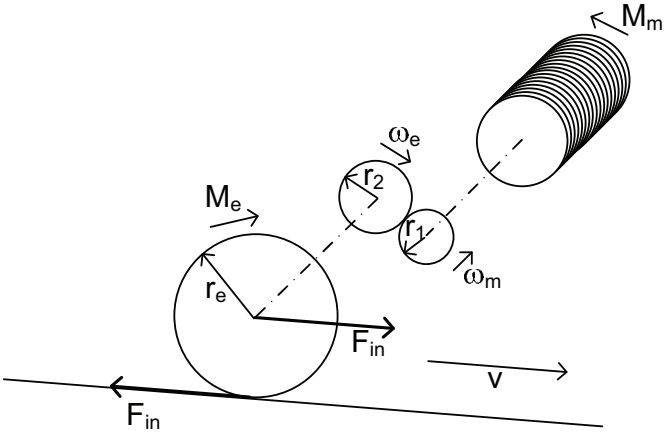


FIG. 4.14 – Diagramme mécanique pour la transmission

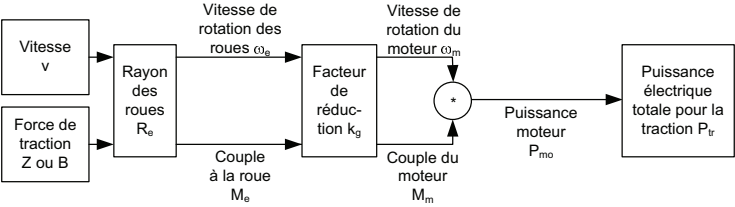


FIG. 4.15 – Chaîne mécanique

$$P_{mo} = M_m \cdot \omega_m \quad (4.15)$$

La puissance électrique prélevée sur le bus de tension continue du véhicule P_{tr} est identique à celle qui est délivrée par le moteur P_{mo} . Ceci est effectué car le rendement de chaque composant du véhicule est pris en considération de manière globale à la fin du calcul.

4.5.3 Modèles électriques

La chaîne électrique pour la transmission de l'énergie entre la caténaire et les moteurs de traction est représentée dans la figure 4.16. Cette structure correspond à celle qui a été retenue pour le simulateur.

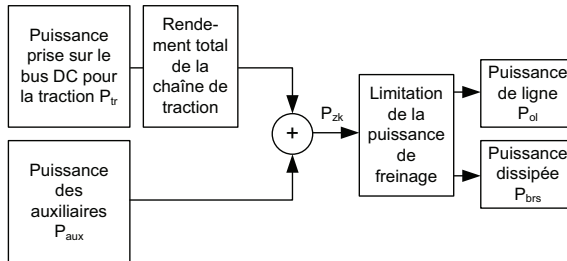


FIG. 4.16 – Structure de la chaîne électrique

La puissance prélevée sur la caténaire par le véhicule correspond à la somme de la puissance nécessaire pour alimenter les moteurs de traction P_{tr} et de la puissance nécessaire pour l'alimentation des auxiliaires P_{aux} . Le rendement des différents composants de traction est introduit à cette étape du calcul et correspond au rendement global de la chaîne de traction. Il inclut le rendement des composants électriques, notamment les convertisseurs statiques, câbles, etc et des composants mécaniques : le moteur, la transmission, etc.

La gestion de l'énergie de freinage qui peut être réinjectée dans la caténaire est également déterminée à cette étape du calcul. La puissance réinjectée est donnée par une fonction dépendante du niveau de tension de la caténaire à l'endroit où se trouve le véhicule.

4.5.4 Modèles du réseau d'alimentation, couplage entre les véhicules

Cette section présente la modélisation retenue pour le réseau d'alimentation dans le simulateur ainsi que les formules pour déterminer la tension de ligne à tout point du réseau.

Modèle de la ligne

La figure 4.17 présente le modèle général d'une ligne de transmission tel que décrit dans [77]. Dans cette figure, R' représente la résistance linéique de la ligne, L' l'inductance linéique modélisant l'effet dû au champ magnétique entre les deux conducteurs, G' la conductance linéique modélisant les pertes dues aux isolateurs et C' la capacité linéique modélisant les pertes dues à la capacité entre les deux conducteurs.

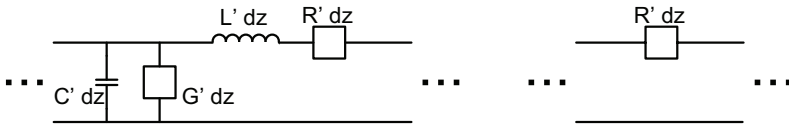


FIG. 4.17 – Modèle de la ligne

Dans le cas d'un réseau de transport urbain, l'effet de la capacité entre le rail et la ligne de contact peut être négligé car la distance entre ces deux conducteurs est suffisamment grande. Les pertes dues aux isolateurs apparaissent principalement aux points où la ligne de contact est connectée aux mâts. L'air est considéré comme un isolateur idéal et donc il n'y a pas de pertes supplémentaires sur la ligne. Les pertes sont très faibles avec les isolateurs récents utilisés sur les mâts et peuvent donc être négligées. Les effets inductifs n'ont pas d'impact lors du calcul du rendement complet du système. Cette composante peut donc aussi être négligée. La figure 4.17 présente le modèle simplifié de la ligne tel qu'il est utilisé dans le logiciel de simulation. Dans ce cas, seule la composante correspondant à la résistance linéique est prise en compte.

La figure 4.18 représente le modèle du parcours étudié. Dans cette figure, la ligne 1 correspond à la voie pour un sens de circulation et la ligne 2 à la voie utilisée pour le retour.

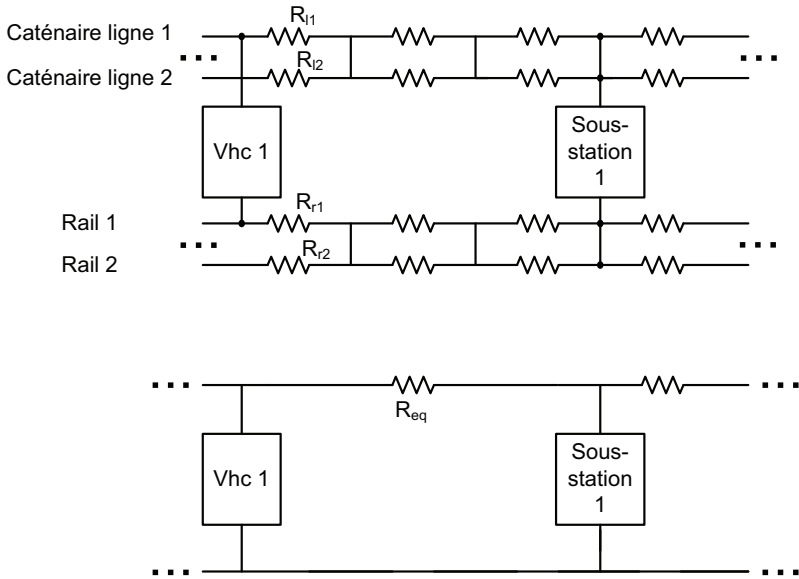


FIG. 4.18 – Simplification du modèle de la ligne

Chaque élément, véhicule ou sous-station, délivrant ou absorbant une puissance sur la ligne est caractérisé comme un point. La résistance équivalente entre chacun de ces points peut dès lors être déterminée à partir de la résistance linéique correspondante. R_r correspond à la résistance équivalente des rails entre deux points et R_l à celle de la caténaire.

Dans le cas étudié d'un réseau de transport urbain, des ponts d'équilibrage entre les deux voies sont utilisés à des intervalles fréquents. Ces ponts sont visibles dans la figure 4.18. La distance entre ces ponts étant faible par rapport à la longueur de la ligne et à la distance entre les véhicules, il est possible de simplifier le modèle par la mise en parallèle des deux résistances équivalentes de caténaire pour chaque sens de circulation. La même simplification peut être faite pour la résistance du rail.

Le modèle final retenu pour l'implémentation du modèle dans le simulateur est donné dans la figure 4.18. Dans ce cas, la résistance équi-

valente R_{eq} est définie pour prendre en compte la résistance due à la caténaire et aux rails.

Une fois que le modèle entre deux points du réseau représenté par un véhicule ou une sous-station est déterminé, le réseau complet peut être modélisé. Il est donné dans la figure 4.19. Dans cette figure $R1$ à $R5$ représentent les résistances équivalentes entre chaque point. La ligne étudiée étant connectée à une extrémité au reste du réseau de transport de la ville, un noeud bilan est ajouté au modèle. Il est utilisé pour modéliser les interactions entre la ligne étudiée et le reste du réseau de transport urbain et est caractérisé par une absorption ou une injection de puissance.

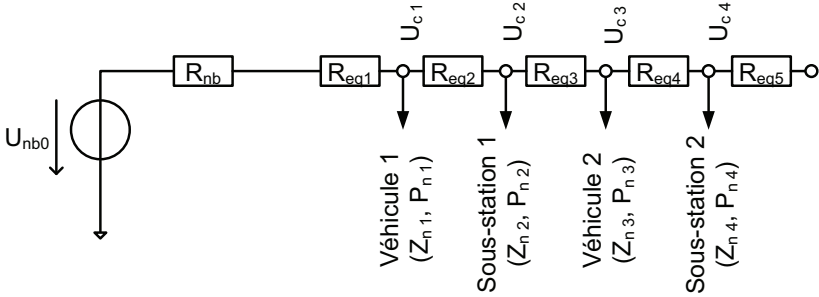


FIG. 4.19 – Modèle de la ligne retenu

4.5.5 Modèle des sous-stations

La figure 4.20 représente le modèle retenu pour les sous-stations. Dans le but d'obtenir de bonnes caractéristiques dynamiques et de pouvoir déconnecter la sous-station en cours de simulation, un modèle incluant une partie inductive est pris en compte. La tension U_0 correspond à la tension à vide de la sous-station. La résistance R_{int} représente les pertes ohmiques internes de la sous-station et la résistance R_{con} modélise la résistance de connexion du câble entre la sous-station et la caténaire.

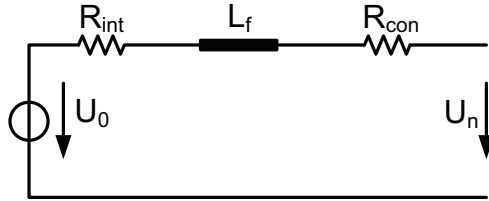


FIG. 4.20 – Modèle des sous-stations

4.5.6 Noeud bilan

Le noeud bilan est utilisé pour modéliser les interactions entre la ligne étudiée et le reste du réseau urbain. Pour le parcours de référence, une extrémité correspond à un terminus et n'est connectée à aucun autre réseau ou ligne alors que l'autre extrémité est interconnectée avec un grand nombre de lignes au centre ville. Le comportement de ce noeud dépend directement de l'état de réceptivité du réseau connecté à la ligne étudiée. Les figures 4.21 et 4.22 représentent les deux structures retenues pour la réalisation du simulateur.

Le reste du réseau, représenté par un noeud bilan, a les propriétés suivantes qui doivent être modélisées :

- Source d'énergie; le reste du réseau possède des sous-stations et/ou des véhicules qui réinjectent de l'énergie de freinage. Cette énergie peut être consommée sur la ligne étudiée.
- Charge; il y a des véhicules qui circulent sur le reste du réseau et qui peuvent absorber de l'énergie fournie par les sous-stations ou

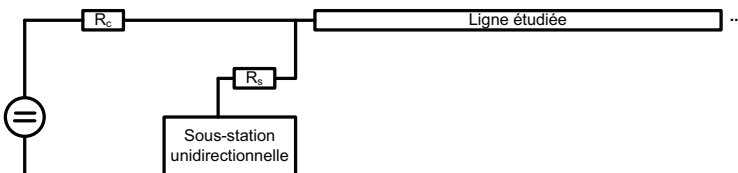


FIG. 4.21 – Modèle du noeud bilan 1 : Source de tension idéale et sous-station

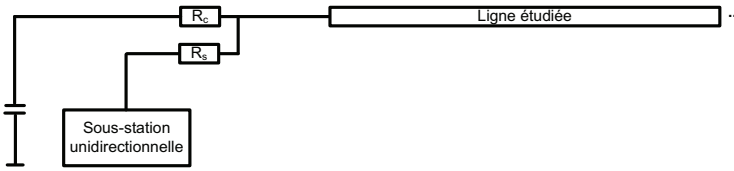


FIG. 4.22 – Modèle du noeud bilan 2 : Capacitif et sous-station

par les véhicules qui se trouvent sur la ligne étudiée.

Le premier modèle retenu, représenté dans la figure 4.21, modélise le noeud bilan par une source de tension idéale en parallèle d'une sous-station unidirectionnelle. La connexion entre la sous-station et le début de la ligne étudiée est représentée par une résistance parasite R_c . La source de tension idéale est connectée en série avec une résistance de ligne R_s entre cette source et le début de la ligne.

Le second modèle retenu est donné dans la figure 4.22. Dans ce cas, le noeud bilan est représenté par une sous-station unidirectionnelle et un condensateur. Le condensateur est utilisé pour modéliser un véhicule sur le reste du réseau qui peut soit absorber, soit réinjecter de l'énergie sur la ligne étudiée. La connexion entre le condensateur et le début de la ligne est représentée par une résistance de ligne R_c . La sous-station est utilisée pour modéliser les sous-stations connectées au reste du réseau et qui peuvent injecter de l'énergie sur la ligne étudiée. La connexion entre cette sous-station et le début de la ligne est représentée par la résistance R_s .

4.5.7 Boucle de calcul dans Simulink

La figure 4.12 représente la boucle de calcul qui est faite dans le simulateur. Il s'agit principalement de boucler la variable de la tension de ligne. Cette dernière est utilisée dans le bloc sous-station pour déterminer la puissance qui est fournie pour cette dernière et dans le bloc véhicule pour calculer la part de la puissance de freinage qui est réinjectée et celle qui est dissipée.

Le logiciel Simulink ne permet pas d'effectuer cette boucle de calcul de manière directe. Il existe principalement deux solutions possibles. La

première consiste à introduire un retard d'une période de calcul et la seconde à ajouter une constante de temps dans la boucle. La seconde solution a été retenue et est représentée dans la figure 4.23.

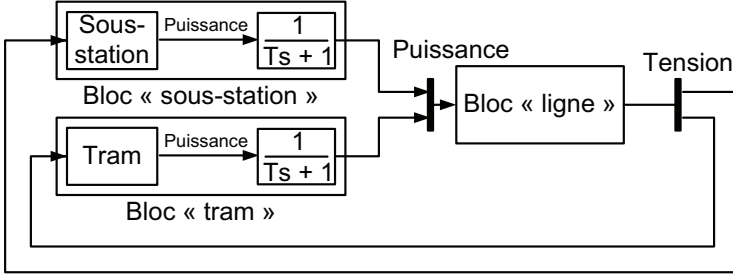


FIG. 4.23 – Structure du simulateur avec les constantes de temps

La constante de temps ajoutée dans le bloc sous-station est utilisée pour modéliser sa propriété inductive (section 4.5.5) et la constante de temps dans le bloc véhicule modélise également la propriété inductive des différents filtres dans le véhicule, tels que les inductances des convertisseurs, les condensateurs de filtrage sur le bus continu, etc.

4.5.8 Méthode de calcul retenue pour déterminer la tension de ligne

Dans les sections précédentes, il a été montré que tout élément connecté à la caténaire est représenté par sa position et sa puissance injectée ou consommée. La convention retenue est qu'une puissance positive correspond à une puissance absorbée par le véhicule alors qu'une puissance injectée est comptée négativement. Dans le cas des sous-stations, la convention est identique et une puissance négative correspond à une puissance injectée sur la ligne.

Ainsi, les variables concernant les véhicules pour le calcul de la tension de ligne se résument aux deux vecteurs suivants :

$$Z_n = \begin{pmatrix} z_{vhc\ 1} \\ \vdots \\ z_{vhc\ n} \end{pmatrix} \quad P_n = \begin{pmatrix} p_{vhc\ 1} \\ \vdots \\ p_{vhc\ n} \end{pmatrix}$$

Les sous-stations sont représentées avec les mêmes variables pour le calcul de la tension de ligne, c'est-à-dire leur position et leur puissance. Dans ce cas, la position z des sous-stations reste fixe. Suite au modèle retenu au début de ce chapitre, les sous-stations sont unidirectionnelles en puissance et donc ne peuvent jamais absorber de puissance. Comme les sous-stations sont caractérisées de manière identique à un véhicule, c'est-à-dire par leur position et leur puissance, ces variables des sous-stations peuvent être ajoutées aux deux vecteurs Z_n et P_n définis ci-avant :

$$Z_n = \begin{pmatrix} z_{vhc\ 1} \\ \vdots \\ z_{vhc\ n} \\ z_{sub\ 1} \\ \vdots \\ z_{sub\ m} \end{pmatrix} \quad P_n = \begin{pmatrix} p_{vhc\ 1} \\ \vdots \\ p_{vhc\ n} \\ p_{sub\ 1} \\ \vdots \\ p_{sub\ n} \end{pmatrix}$$

Les résistances $R_{eq1} \dots R_{eqn}$ correspondant à la résistance équivalente de ligne entre chaque point d'injection de puissance sur la caténaire peuvent être déterminées par la multiplication de la distance entre deux points d'injection par la résistance linéique de la caténaire. Ainsi, les matrices Z'_n et P'_n correspondent aux matrices Z et P , mais en ordonnant les valeurs selon leur position croissante le long de la ligne. La matrice des résistances de ligne R_L peut dès lors être définie :

$$R_L = \begin{pmatrix} R_{eq1} \\ R_{eq2} \\ R_{eq3} \\ R_{eq4} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Le calcul de la tension de ligne est effectué de manière itérative. La première étape consiste à initialiser la matrice des tensions de ligne de la manière suivante où U_{nb0} correspond à la tension à vide du noeud bilan :

$$U'_n = \begin{pmatrix} U_{nb0} \\ U_{nb0} \\ U_{nb0} \\ U_{nb0} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

L'itération consiste premièrement à calculer le courant à chaque noeud i'_n , deuxièmement à déterminer le courant circulant sur chaque section de la ligne I'_l , troisièmement à déterminer le courant I_{NB} et la tension V_{NB} qui correspondent au courant et à la tension au début de la ligne, quatrièmement à déterminer la nouvelle matrice correspondant à la tension à chaque noeud U'_n . Pour la réalisation du simulateur, cette boucle est calculée 3 fois de suite. Dans ces calculs, la sous-station utilisée pour la modélisation du noeud bilan est comptée comme étant une sous-station connectée au début de la ligne et dont la résistance R_s est comptée comme étant la résistance de connexion.

$$I'_n = \begin{pmatrix} P'_{n1}/U'_{n1} \\ P'_{n2}/U'_{n2} \\ P'_{n3}/U'_{n3} \\ P'_{n4}/U'_{n4} \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

$$I'_l = \begin{pmatrix} I'_{n4} + I'_{n3} + I'_{n2} + I'_{n1} \\ I'_{n4} + I'_{n3} + I'_{n2} \\ I'_{n4} + I'_{n3} \\ I'_{n4} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

$$I_{NB} = I'_{l1} = I'_{n4} + I'_{n3} + I'_{n2} + I'_{n1} \quad (4.20)$$

$$U_{NB} = U(nb0) - (R_c \cdot I_{NB}) \quad (4.21)$$

$$U'_n = \begin{pmatrix} U_{NB} - (R'_{L1} \cdot I'_{n1}) \\ U_{NB} - (R'_{L1} \cdot I'_{n1}) - (R'_{L2} \cdot I'_{n2}) \\ U_{NB} - (R'_{L1} \cdot I'_{n1}) - (R'_{L2} \cdot I'_{n2}) - (R'_{L3} \cdot I'_{n3}) \\ U_{NB} - (R'_{L1} \cdot I'_{n1}) - (R'_{L2} \cdot I'_{n2}) - (R'_{L3} \cdot I'_{n3}) - (R'_{L4} \cdot I'_{n4}) \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Une fois que la matrice des tensions U'_n a été déterminée, il est possible de réordonner cette matrice pour retrouver la tension de chaque point U_n dans le même ordre que celui des matrices Z_n et P_n .

4.6 Paramètres du véhicule et de la ligne utilisés pour les simulations

Cette section présente les paramètres des véhicules et de l'infrastructure fixe qui sont introduits dans le simulateur pour la suite de ce chapitre.

Les paramètres principaux de la ligne sont donnés dans la section 4.2. La distance entre chaque station, la dénivellation et les courbes y sont présentées. La vitesse maximale des véhicules en fonction de la position et les paramètres relatifs aux sous-stations sont également décrits dans cette section. La tension à vide de chaque sous-station est de 820 Volts.

La résistance équivalente linéique $R_{eq,lin}$ de la ligne en fonction de la position z est donnée dans le tableau 4.5.

Position z (m)	Résistance linéique $R_{eq,lin}$ Ω/m
0 - 5682	0.0540
5682 - 5802	0.0713
5802 - 8073	0.0363

TAB. 4.5 – Résistance linéique équivalente

La force de traction maximale du véhicule est de 70 kN pour des vitesses inférieures à 27 km/h. La force de freinage maximale est de 70 kN pour toute vitesse inférieure à 60 km/h. La tension maximale à la caténaire pour réinjecter la totalité de l'énergie de freinage est de 895 Volts. A 905 Volts, plus aucune puissance n'est réinjectée. La puissance des auxiliaires est de 30 kW constante durant la totalité du parcours, y compris pendant les arrêts aux stations.

Le temps à chaque arrêt pour le véhicule est de 20 secondes. A la station terminus, le temps d'arrêt est fixé à 300 secondes. Durant la totalité du parcours, chaque véhicule est complètement chargé. C'est-à-dire que 182 personnes de 80 kilos sont à bord.

Le modèle retenu pour le noeud bilan (voir section 4.5.6) est de type capacitif. La valeur du condensateur est de 10 Farads et la tension à vide de la sous-station correspondante est de 820 Volts.

Dans les cas où le véhicule est muni d'un système de stockage d'énergie, le poids supplémentaire à vide est de 1 tonne pour les deux bancs stockeurs d'énergie ajoutés. Le condensateur équivalent de chaque banc

de supercondensateurs embarqué est de 36 Farads et sa plage de tension est comprise entre 180 et 360 Volts. Ainsi, l'énergie exploitable est de 0.486 kWh pour chaque banc stockeur, ce qui correspond à 75 % de l'énergie totale du banc stockeur. Pour le véhicule complet, l'énergie totale disponible est donc de 0.972 kWh.

4.7 Résultats pour un véhicule avec et sans stockeur

Cette section présente et compare les résultats obtenus pour un véhicule sans et un avec stockeur d'énergie pour un trajet compris entre deux stations. Une phase complète d'accélération, d'avancement à vitesse constante et de freinage est présentée.

La figure 4.24 représente les courbes des différentes puissances dans le cas d'un véhicule standard sans stockeur d'énergie. La courbe bleu clair, nommée puissance maximale pour le véhicule, représente la puissance théorique maximale que le véhicule peut prélever sur la caténaire

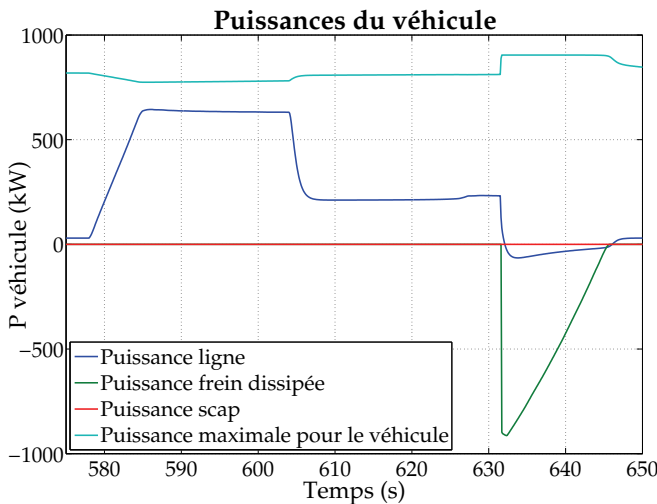


FIG. 4.24 – Accélération - freinage d'un véhicule sans stockeur

en fonction de la tension de ligne. En effet, en cas d'effondrement de cette tension, la puissance de traction du véhicule doit être diminuée pour ne pas affaiblir davantage le réseau. La courbe bleu foncé représente la puissance prélevée, respectivement réinjectée à la ligne. La courbe verte montre la puissance de freinage qui est dissipée dans le chopper de freinage. La convention pour la puissance de la ligne est qu'une puissance positive correspond à une puissance prélevée par le véhicule alors qu'une puissance négative correspond à une puissance injectée. Pour la puissance de freinage, une puissance négative correspond à une puissance dissipée.

Par étude de la courbe de la puissance de la ligne, il est possible de mettre en avant les phases caractéristiques d'accélération et de freinage qui se retrouvent typiquement entre chaque arrêt. Comme le véhicule ne comporte pas d'éléments stockeurs, la puissance prélevée à la caténaire est identique, aux pertes près et en tenant compte de la puissance des auxiliaires, à la puissance des moteurs de traction pour la phase d'accélération. La première phase est constituée d'une rampe de puissance prélevée à la caténaire. Dans ce cas, le véhicule accélère en développant la force maximale qui peut être appliquée aux roues. Cette force maximale est constante jusqu'à une vitesse de 27 km/h pour le cas étudié. Pour des vitesses supérieures, cette force maximale diminue et la puissance qui peut être délivrée aux roues est constante. Ainsi, il est possible de voir la deuxième phase, qui présente une puissance constante. Une fois la vitesse maximale atteinte, la puissance de traction diminue et se stabilise pour fournir la puissance nécessaire pour vaincre les forces de frottement. Lors de la quatrième phase, correspondant au freinage qui s'effectue à force constante, seule une petite partie de l'énergie de freinage est réinjectée dans la caténaire, le solde de la puissance de freinage est dissipé dans les résistances de freinage. Durant la totalité du parcours, une puissance pour les auxiliaires de 30 kW constante est prélevée à la caténaire.

La figure 4.25 représente les mêmes courbes que ci-dessus pour un véhicule muni d'un système d'assistance en puissance dans les mêmes conditions d'exploitation que la figure 4.24. Quatre phases peuvent être identifiées de la même manière que pour un véhicule sans stockeur d'énergie. Dans ce cas-ci, la puissance prélevée à la caténaire ne correspond plus à la puissance des moteurs de traction. En effet, la puissance de traction et des auxiliaires correspond à la somme de la puissance

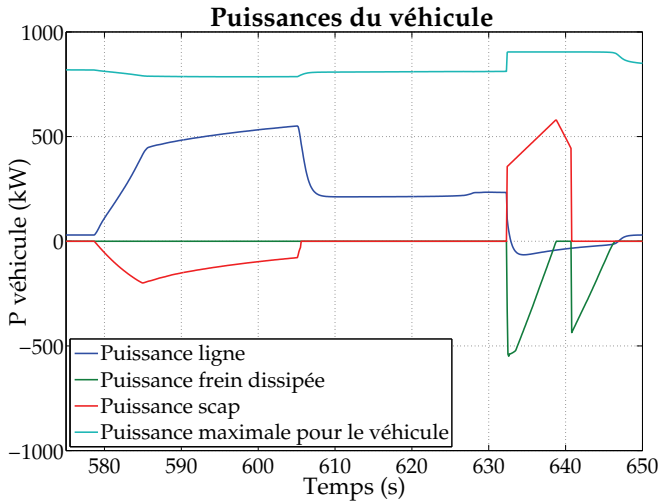


FIG. 4.25 – Accélération - freinage d'un véhicule avec stockeur

fournie par le stockeur d'énergie et de la puissance prise à la caténaire, sans tenir compte des pertes.

Dans la figure 4.25, la convention suivante est prise concernant la puissance du banc de supercondensateurs : une puissance négative correspond à une décharge du banc et une puissance positive correspond à une charge du banc.

Ainsi, durant la phase d'accélération à force puis à puissance constantes, la puissance des moteurs est assurée conjointement par la caténaire et le stockeur d'énergie. Lors de la phase à vitesse constante où la puissance requise pour les moteurs de traction est faible, toute la puissance est directement prélevée sur la caténaire. Lors de la phase de freinage, la puissance réinjectée à la caténaire est identique au cas où le véhicule n'a pas de stockeur, mais pas la puissance dissipée. En effet, une part de cette puissance est utilisée pour recharger le banc stockeur et est représentée par la courbe rouge. La recharge s'effectue en plusieurs étapes :

1. Recharge à courant constant, courant qui correspond au courant de recharge maximal du banc stockeur. La représentation dans la

figure 4.25 est donc une droite à pente croissante pour la puissance de recharge, le courant reste constant et donc la tension du banc augmente.

2. Recharge en utilisant la totalité de la puissance disponible. Dans ce cas, toute la puissance de freinage qui n'est pas réinjectée dans la caténaire est utilisée pour recharger le banc stockeur. Ceci se traduit dans la figure 4.25 par une droite avec une pente négative.
3. Plus de recharge du banc. Dans cette étape, le stockeur d'énergie est complètement chargé et toute la puissance de freinage qui ne peut pas être réinjectée dans la caténaire est dissipée.

4.8 Résultats pour un réseau de véhicules standards

Cette section présente les résultats obtenus avec le logiciel de simulation lorsque des véhicules standards sans stockeur d'énergie circulent sur le parcours de référence. La première partie de cette section étudie le réseau de transport lorsqu'un seul véhicule circule sur la ligne. Dans ce cas, aucune interaction avec un autre véhicule n'est possible et la caténaire a une propriété de non-réceptivité. La seconde partie présente les résultats lorsque les véhicules se suivent à intervalle de 5 minutes sur le parcours. Dans ce cas, la caténaire est plus réceptive et des interactions de puissance entre les véhicules sont possibles.

4.8.1 1 véhicule sur le parcours

Dans le cas présenté ici, un seul véhicule est en circulation sur la ligne de référence. Les résultats des simulations sont donnés dans les figures 4.26 et 4.27 qui présentent respectivement les profils de la puissance du véhicule et de la tension de la caténaire à l'endroit où se trouve le véhicule. La chute de tension maximale sur la totalité du parcours est observée lorsque le véhicule accélère en bout de ligne. Elle est de 724 Volts alors que la tension à vide de la ligne est de 820 V.

Sur la figure 4.26 sont représentées la puissance maximale théorique que le véhicule peut prélever sur la caténaire en fonction de la tension instantanée, la puissance qui est échangée entre le véhicule et la ligne

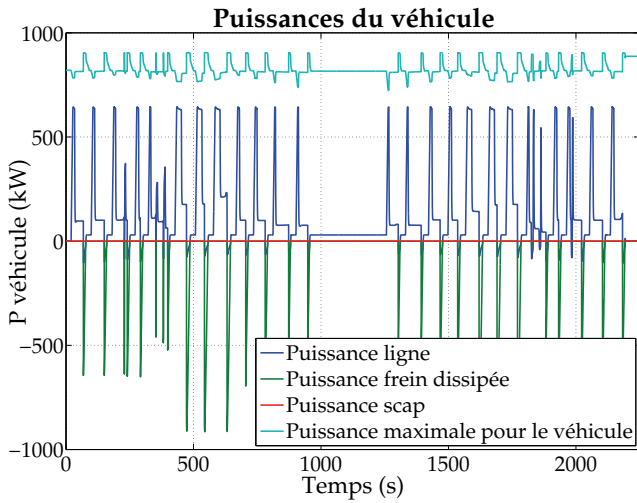


FIG. 4.26 – Puissances d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule sur la ligne)

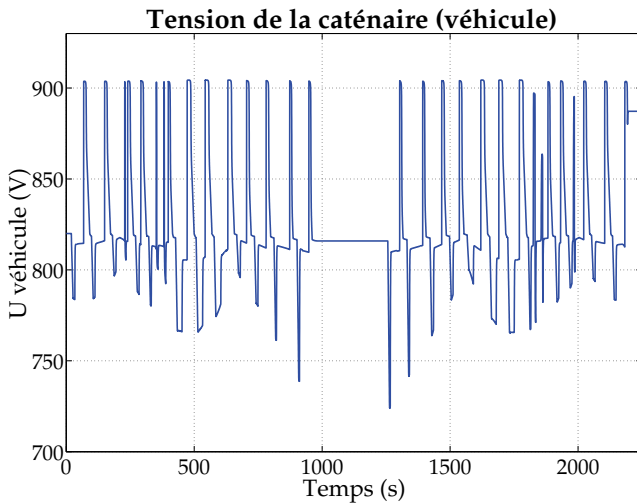


FIG. 4.27 – Tension à la ligne d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule sur la ligne)

de contact et la puissance de freinage qui est dissipée. La convention pour la puissance prélevée sur la caténaire est qu'une valeur positive correspond à une puissance absorbée par le véhicule et une valeur négative correspond à une puissance réinjectée. La convention retenue pour la puissance de freinage est qu'une puissance négative correspond à une puissance dissipée dans les résistances de freinage.

La part de la puissance de freinage qui est réinjectée sur la caténaire est très faible et peut être mise en évidence dans la figure 4.26. Le solde de cette puissance est dissipée sous forme de chaleur. Ceci est dû au fait qu'aucun autre véhicule connecté au réseau se situe à proximité de celui qui freine pour pouvoir absorber instantanément cette puissance. Ainsi, un véhicule ayant la structure et les composants pour pouvoir réinjecter sa puissance de freinage sur la caténaire n'est pas suffisant pour la valoriser de manière optimale ; il faut également que le réseau soit réceptif, c'est-à-dire qu'un autre consommateur se trouve proche du véhicule qui freine.

Dans le parcours de référence, un bon dimensionnement du réseau de distribution de l'énergie permet de ne jamais devoir réduire les propriétés dynamiques des véhicules en raison d'une chute de tension trop importante sur la caténaire. Ainsi, les sous-stations et le diamètre de câble de la caténaire sont suffisants pour cette application. Les caractéristiques maximales du véhicule peuvent donc être exploitées sur la totalité du parcours.

La figure 4.27 représente la tension de la caténaire à l'endroit où se trouve le véhicule. Sur la totalité du parcours, la chute de tension maximale sur la caténaire est observée lorsque le véhicule accélère en bout de ligne et est de 724 V. En effet, c'est dans ce cas que la distance entre le véhicule et la sous-station la plus proche est la plus grande pour le parcours complet. Cette chute de tension sur la caténaire est due, premièrement aux contraintes en puissance appliquées par le véhicule qui imposent le courant qui y circule et deuxièmement à sa résistance linéique. Toute chute de tension sur la caténaire par rapport à la tension nominale de 820 V est une image des pertes sur le réseau de distribution de l'énergie. Pour réduire ces pertes, il est possible soit de diminuer les contraintes en puissance du véhicule par la diminution des propriétés dynamiques du véhicule ou par l'ajout d'un système d'assistance en puissance, soit d'augmenter la section du câble de la caténaire et donc de diminuer la résistance linéique. La suite de ce chapitre présente

une étude concernant l'effet sur le rendement énergétique du réseau de transport lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance dans les véhicules.

Lors de chaque freinage, la tension de la caténaire montre un pic de 905 Volts alors que sa tension à vide est de 820 Volts. La valeur de 905 V correspond à la tension maximale pour que le véhicule puisse réinjecter de la puissance de freinage. Dans le cas présenté ici, il n'y a pas de consommateur proche et la tension de ligne atteint très rapidement cette valeur maximale lors de chaque freinage. Une fois que cette valeur est atteinte, le solde de la puissance de freinage est dissipée.

L'énergie consommée pour le cas de fonctionnement présenté dans cette section et la mise en évidence des pertes énergétiques dans le réseau de transport sont détaillées dans la section 4.10.

4.8.2 1 véhicule toutes les 5 minutes sur le parcours

Cette section présente les résultats graphiques lorsque les véhicules se suivent à 5 minutes d'intervalle sur la ligne de référence et lorsque la totalité des véhicules n'ont pas de système d'assistance en puissance. Les caractéristiques dynamiques de chaque véhicule et les propriétés de la caténaire et des sous-stations sont identiques au cas présenté dans la section 4.8.1. Les graphiques 4.28 et 4.29 présentent les résultats concernant les puissances et la tension à la caténaire pour un véhicule circulant sur ce réseau.

Les conventions pour les puissances retenues pour ces graphiques sont identiques à celles définies dans la section précédente. Lors des accélérations en bout de ligne, la puissance du véhicule est proche de la puissance maximale théorique qu'il peut prélever sur la caténaire. Cette puissance maximale théorique est définie par rapport à la tension instantanée de la caténaire au lieu où se trouve le véhicule et lorsqu'elle est atteinte, les performances dynamiques du véhicules doivent être diminuées. La charge appliquée sur le réseau de référence est proche de la charge maximale qui peut être appliquée sur le réseau de référence pour le cas retenu dans cette section.

Par rapport au cas où le véhicule est seul sur la ligne, la part de la puissance de freinage qui est réinjectée sur la caténaire est plus importante. Ceci est dû au fait que d'autres véhicules se trouvent à proximité de celui qui freine et qu'ils absorbent une partie de la puissance de frei-

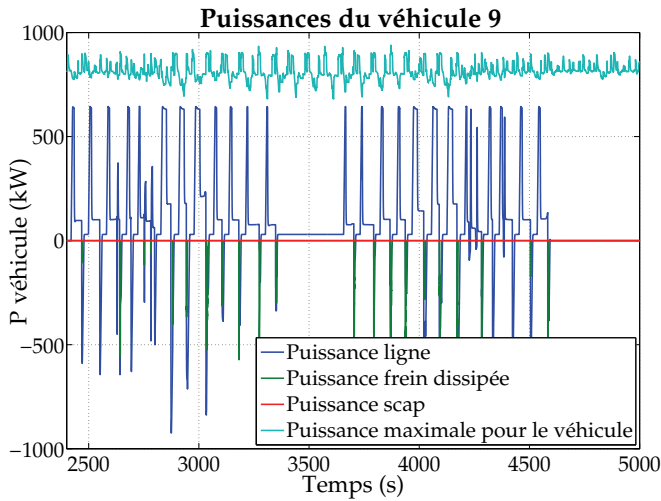


FIG. 4.28 – Puissances d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)

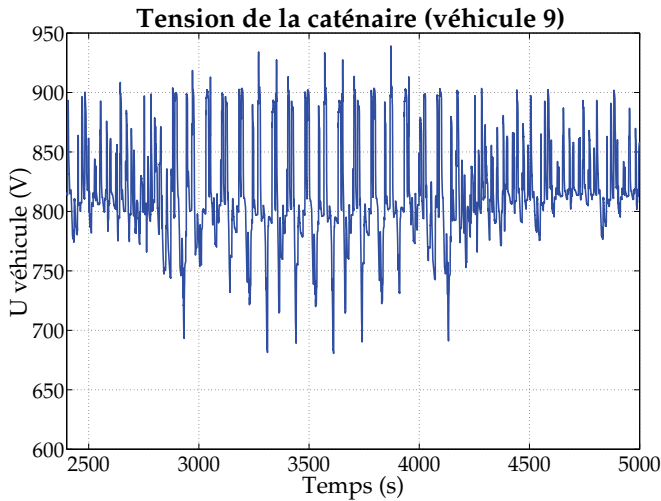


FIG. 4.29 – Tension à la ligne d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)

nage du véhicule qui freine. Toutefois, en prenant en compte la totalité du parcours, seule une faible part de l'énergie totale de freinage est réinjectée : les conditions requises pour une réinjection complète de cette énergie sont rarement réunies en même temps. Les résultats concernant la quantité d'énergie dissipée sur le parcours sont présentés en détail dans la section 4.10.

La figure 4.29 représente la tension de la caténaire pour un véhicule circulant sur le réseau. Cette tension est définie comme étant celle de contact entre la caténaire et le véhicule à l'endroit où il se situe. Les interactions dues aux autres véhicules circulant sur la même ligne se retrouvent sur ce graphe et sont caractérisées par une multitude de variations de cette tension. En effet lors de chaque démarrage d'un véhicule sur le réseau, la tension de ligne diminue à cause du courant nécessaire et lors de chaque freinage, la tension de ligne augmente jusqu'à la tension maximale de réinjection de puissance de freinage qui est de 905 Volts.

Lors du parcours complet, la chute de tension maximale observée sur la caténaire est de 680 Volts. Elle se produit lorsque le véhicule accélère en bout de ligne. Cette chute maximale de tension est plus importante dans ce cas que dans le cas où un seul véhicule circule sur le parcours à cause des autres véhicules qui prélèvent simultanément de la puissance sur la caténaire.

Les résultats détaillés concernant la quantité d'énergie consommée par le réseau de transport et la mise en évidence des pertes énergétiques sont présentés dans la section 4.10.

4.9 Résultats pour un réseau de véhicules avec un stockeur d'énergie

Cette section présente les résultats obtenus avec le simulateur lorsque tous les véhicules sont équipés d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué dont le poids supplémentaire est de 1 tonne pour chaque véhicule. Les autres paramètres des véhicules ainsi que les caractéristiques des sous-stations et de la caténaire sont identiques aux cas présentés dans la section 4.8. Les résultats lorsqu'un seul véhicule est sur le parcours et lorsque les véhicules se suivent avec un intervalle de temps de 5 minutes sur le parcours sont présentés. Les résultats détaillés concernant la consommation énergétique du réseau

complet ainsi que l'étude concernant la réduction de la consommation d'énergie par rapport à des véhicules sans stockeur d'énergie embarqué sont donnés dans la section 4.10.

4.9.1 1 véhicule sur le parcours

Les résultats lorsqu'un seul véhicule avec un système d'assistance en puissance embarqué circule sur le parcours de référence sont présentés dans les figures 4.30 et 4.31. De manière identique aux cas précédents, les puissances instantanées et la tension de la caténaire y sont représentés.

Les conventions pour la puissance prélevée à la ligne, la puissance de freinage et la puissance maximale théorique qui peut être prélevée sur la caténaire en fonction de l'état de charge de la ligne sont identiques au cas où le véhicule n'a pas de stockeur embarqué présenté dans la section 4.8.1. La convention concernant la puissance du banc stockeur d'énergie de type supercapacitif est la suivante : une puissance positive correspond à un flux d'énergie du bus de tension continue vers le stockeur d'énergie, ce qui correspond à une charge du stockeur d'énergie et une puissance négative correspond à un flux d'énergie du banc stockeur vers le bus à tension continue, ce qui correspond à une décharge du stockeur d'énergie.

La figure 4.30 montre que les contraintes en puissance appliquées sur la caténaire par le véhicule sont réduites. Lors de l'accélération maximale du parcours complet, la puissance électrique prélevée sur la caténaire est de 550 kW alors qu'elle est de 640 kW pour la même accélération avec un véhicule sans système d'assistance en puissance. La diminution de la puissance instantanée maximale consommée par le véhicule est de 90 kW. Cette baisse des contraintes sur le réseau d'alimentation réduit le courant qui circule dans la caténaire et celui qui transite dans les sous-stations. Les pertes associées à ces deux éléments sont donc réduites.

L'énergie récupérée par le stockeur d'énergie lors des freinages est réinjectée dans le système de traction lors de la phase d'accélération suivante. Dans le cas où l'énergie récupérée lors d'un freinage n'est pas suffisante pour recharger complètement le banc stockeur d'énergie, une faible puissance constante est prélevée sur la caténaire lors de l'arrêt dans le but de terminer la recharge. Du fait qu'une partie de l'énergie de freinage est récupérée, la puissance dissipée dans les résistances de freinages, telle que représentée dans la figure 4.30, est diminuée par rap-

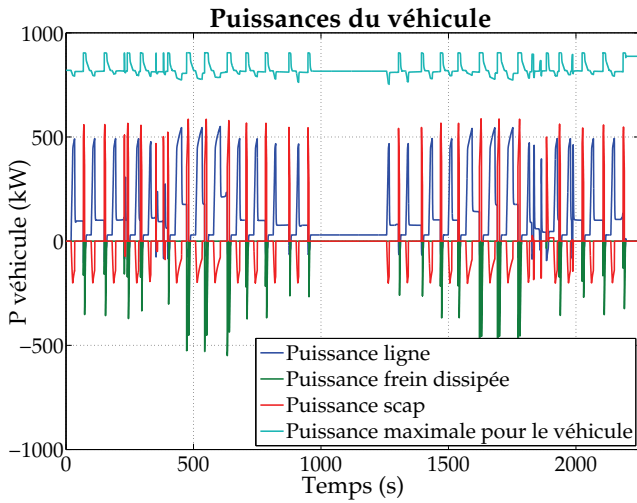


FIG. 4.30 – Puissances d'un véhicule avec stockeur
(1 véhicule sur la ligne)

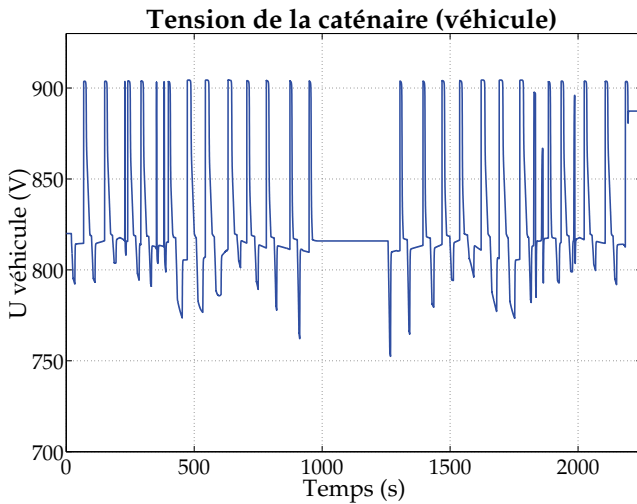


FIG. 4.31 – Tension à la ligne d'un véhicule avec stockeur
(1 véhicule sur la ligne)

port au cas où le véhicule n'a pas de système d'assistance en puissance.

La figure 4.31 représente la tension de la caténaire à l'endroit où se trouve le véhicule. La chute de tension maximale est de 752 V dans ce cas et elle était de 724 V dans le cas où le véhicule n'a pas de stockeur d'énergie embarqué. La réduction de cette chute de tension est liée à la diminution du courant circulant dans la caténaire. Dans ce cas, comme le réseau d'alimentation est moins chargé, il est possible, sans changer l'infrastructure fixe des sous-stations et des caténaires, d'augmenter les caractéristiques dynamiques du véhicule ou d'augmenter la charge utile des véhicules.

4.9.2 1 véhicule toutes les 5 minutes sur le parcours

Cette section présente les résultats obtenus avec le simulateur lorsque la totalité des véhicules a un système d'assistance en puissance embarqué et lorsque le temps entre chaque véhicule est de 5 minutes. Les conditions d'exploitation et les propriétés des véhicules et de l'infrastructure fixe est identique à celles de la section 4.8.2.

Les figures 4.32 et 4.33 présentent les puissances pour un véhicule du réseau et la tension à la caténaire pour ce même véhicule. Les conventions retenues pour la représentation des différentes puissances sont identiques à celles qui ont été définies dans les sections précédentes. Dans le cas présenté ici, la limitation de la puissance maximale en fonction de la tension de la caténaire n'est jamais atteinte durant la totalité du parcours. La marge entre la puissance effectivement prélevée et la puissance maximale théorique est plus importante que dans le cas de véhicules sans système d'assistance en puissance, ce qui montre que la charge appliquée sur le réseau peut être augmentée. Par rapport aux autres cas présentés dans ce chapitre, la puissance de freinage qui est dissipée dans ce cas est très faible car les autres véhicules du réseau et le système de stockage d'énergie embarqué sont suffisants pour exploiter la totalité de l'énergie de freinage des véhicules. Les résultats détaillés concernant l'énergie qui est dissipée et celle qui est consommée par le réseau sont donnés dans la section 4.10.

La figure 4.33 donne la tension de la caténaire pour le même véhicule. La chute de tension maximale observée sur la totalité du parcours est de 717 Volts alors qu'elle est de 680 Volts dans le cas où les véhicules n'ont pas de système d'assistance en puissance.

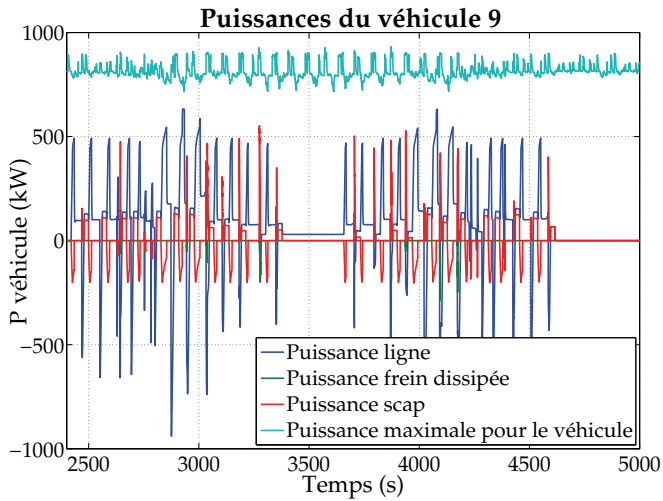


FIG. 4.32 – Puissances d'un véhicule avec stockeur
(1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)

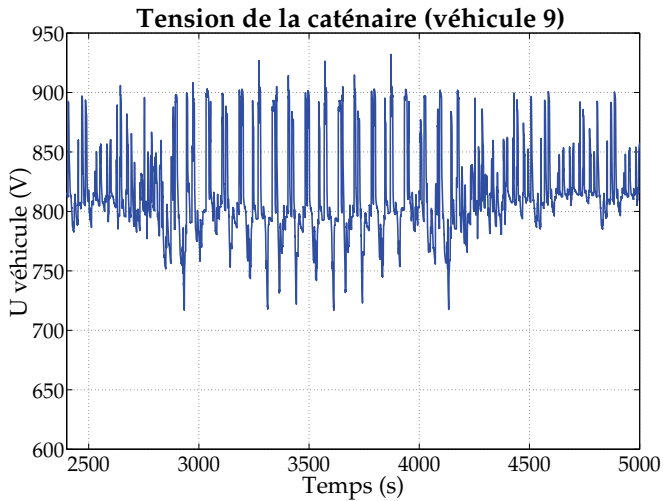


FIG. 4.33 – Tension à la ligne d'un véhicule avec stockeur
(1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)

L'ajout de véhicules ayant un système de stockage d'énergie embarqué permet, sans effectuer de modifications sur le réseau de distribution d'énergie (sous-stations et caténaires), soit d'augmenter le nombre de véhicules circulant simultanément sur le réseau, soit d'augmenter les caractéristiques dynamiques des véhicules (accélération plus importante, vitesse maximale plus grande,...) ou encore d'augmenter la charge utile des véhicules en ajoutant par exemple un wagon à chaque rame. Toutes ces améliorations concernant le confort des usagers peuvent être atteintes sans coûts supplémentaires concernant l'infrastructure fixe du réseau.

Les résultats détaillés concernant la consommation énergétique du réseau et les pertes dans le système sont donnés dans la section 4.10. Dans cette section, un cas supplémentaire représentant un réseau mixte est ajouté et correspond au cas où un véhicule sur deux est équipé d'un système d'assistance en puissance.

4.10 Consommation énergétique du réseau de transport

Cette section étudie la consommation énergétique du réseau de transport pour les différents cas retenus dans les sections 4.8 et 4.9 et présente une comparaison lorsque des véhicules sans et des véhicules avec un stockeur d'énergie embarqué circulent. Ainsi, une première comparaison est effectuée lorsque un seul véhicule circule sur le parcours, et une seconde est faite pour un réseau de véhicules dont le temps entre chaque véhicule est de 5 minutes.

La suite de ce chapitre présente les résultats concernant l'effet sur la consommation énergétique du réseau de transport en faisant varier un paramètre concernant les véhicules ou l'infrastructure fixe. La première comparaison est effectuée lorsque seule une partie des véhicules sont équipés d'un système d'assistance en puissance alors que le reste ne l'est pas. Le second cas présente l'effet sur la consommation énergétique lorsque le poids à vide de chaque véhicule est réduit, le troisième lorsque la puissance des auxiliaires est réduite et le quatrième lorsque la résistance linéique de la caténaire est modifiée.

4.10.1 Un seul véhicule sur la ligne

Le tableau 4.6 présente les résultats de la consommation énergétique du réseau de transport dans le cas où un seul véhicule circule sur le parcours. La consommation est donnée lorsque le véhicule n'est pas équipé d'un stockeur d'énergie et dans le cas où il l'est. Le calcul de la consommation énergétique est réalisé pour une durée de 3000 secondes. Cet intervalle de temps est supérieur au temps nécessaire pour que le véhicule parcoure la totalité du parcours, trajet aller et retour.

	1 véhicule sur la ligne, pas de stockeur	1 véhicule sur la ligne, avec stockeur
Energie prise sur la caténaire par le véhicule	85.30 kWh	71.36 kWh
Energie réinjectée sur la caténaire par le véhicule	3.72 kWh	3.74 kWh
Energie dissipée par le véhicule (freinage)	26.76 kWh	9.77 kWh
Energie totale pour le véhicule	81.58 kWh	67.62 kWh
Energie totale pour le réseau (sous-stations)	84.20 kWh	69.2 kWh
Energie dissipée dans les caténaires	2.20 kWh	1.34 kWh
Energie dissipée dans la connexion de la ssta 1	0.02 kWh	0.01 kWh
Energie dissipée par les pertes internes de la ssta 1	0.11 kWh	0.06 kWh
Energie dissipée dans la connexion de la ssta 2	0.02 kWh	0.01 kWh
Energie dissipée dans les pertes internes de la ssta 2	0.27 kWh	0.16 kWh

TAB. 4.6 – Comparaison des résultats (1 véhicule sur la ligne)

L'énergie totale consommée par le réseau est définie par l'addition de l'énergie prélevée sur le réseau industriel par les deux sous-stations et de la contribution du noeud bilan. Les deux composantes du noeud bilan, soit la sous-station et le condensateur, sont comptées comme une injection d'énergie en début de ligne. Ainsi, les pertes internes et de connexion de la sous-station du noeud bilan et les pertes de connexion du condensateur de la sous-station ne sont pas prises en compte dans le calcul de l'énergie totale consommée par le réseau.

La consommation totale du réseau pour un véhicule sans stockeur d'énergie est de 84.20 kWh alors qu'elle est de 69.20 kWh pour un véhicule avec un stockeur d'énergie embarqué. La diminution de la consommation totale est alors de 18 % et est atteinte sans modifier le réseau fixe de distribution d'énergie (sous-stations et caténaires) et sans modifier les propriétés dynamiques du véhicule.

Le système de stockage d'énergie embarqué permet de récupérer 16.99 kWh de l'énergie de freinage, mais 9.77 kWh de cette énergie est toujours dissipée. Dans le cas d'un véhicule standard, l'énergie dissipée est de 26.76 kWh. Ceci correspond à une diminution de 63 % de l'énergie dissipée pour le parcours complet.

Le système d'assistance en puissance embarqué dans le véhicule permet de diminuer les pertes énergétiques de 39 % dans les caténaires alors que les besoins en énergie au niveau du véhicule sont réduits de 17 %.

Un véhicule avec un système de stockage d'énergie embarqué tel qu'il a été défini dans ce chapitre a été construit par l'entreprise Bombardier et est en exploitation sur la ligne utilisée comme référence. La diminution de la consommation d'énergie mesurée pour le véhicule est comprise entre 24 et 27 %. Le gain sur la consommation totale du réseau a été évalué à environ 30 % par cette entreprise. Ces résultats sont supérieurs à ceux trouvés avec le simulateur développé dans ce chapitre. Ceci est dû au fait que le stockeur d'énergie embarqué dans le véhicule construit est de 1.7 kWh, soit 31 % plus grand que celui qui a été retenu pour les simulations, que la consommation des auxiliaires n'est pas prise en compte et que le véhicule n'est pas complètement chargé. Lorsque les mêmes conditions sont introduites dans le simulateur, le gain sur la consommation d'énergie trouvé au niveau du véhicule seul est de 25.6 %. Ce résultat est donc conforme aux mesures qui ont été faites.

4.10.2 Un véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne

Le tableau 4.7 présente les résultats de la consommation énergétique du réseau de transport lorsque les véhicules se suivent à 5 minutes d'intervalle. Le calcul de l'énergie est effectué sur une durée de 2600 se-

	Réseau (5 min), pas de stockeur	Réseau (5 min), avec stockeur	Réseau (5 min), mixte
Energie totale pour le système (sous-stations)	567.1 kWh	521.3 kWh	541.4 kWh
Energie dissipée dans les caténaires	29.0 kWh	22.1 kWh	25.6 kWh
Energie de la ssta 1 (niveau réseau de distribution)	179.8 kWh	171.0 kWh	175.1 kWh
Energie dissipée dans la connexion de la ssta 1	0.2 kWh	0.2 kWh	0.2 kWh
Energie dissipée par les pertes internes de la ssta 1	1.2 kWh	1.0 kWh	1.1 kWh
Energie de la ssta 2 (niveau réseau de distribution)	332.3 kWh	297.1 kWh	312.2 kWh
Energie dissipée dans la connexion de la ssta 2	0.5 kWh	0.3 kWh	0.4 kWh
Energie dissipée dans les pertes internes de la ssta 2	5.5 kWh	3.9 kWh	4.6 kWh
Energie fournie par le noeud bilan (condensateur)	-0.5 kWh	-0.5 kWh	-0.5 kWh
Energie fournie par le noeud bilan (ssta)	55.5 kWh	53.7 kWh	54.6 kWh

TAB. 4.7 – Comparaison des résultats (Réseaux de véhicules)

condes. La définition de l'énergie consommée par le réseau de transport est identique au cas présenté dans la section précédente.

Le tableau 4.7 présente les résultats pour les cas suivants :

1. Tous les véhicules n'ont pas de système d'assistance en puissance
2. Tous les véhicules ont un système d'assistance en puissance embarqué
3. Un véhicule sur deux est équipé d'un système d'assistance en puissance embarqué

L'énergie totale consommée par le réseau de transport est de 567.1 kWh pour le cas où tous les véhicules n'ont pas de stockeur d'énergie et de 521.3 kWh lorsque tous les véhicules ont un stockeur d'énergie embarqué. La diminution de la consommation énergétique totale est de 8 % alors que l'énergie dissipée dans les caténaires est diminuée de 24 %.

4.10.3 Pourcentage de véhicules avec un stockeur embarqué dans le réseau de transport

La dépendance entre la consommation énergétique du réseau et la proportion de véhicules embarquant un système d'assistance est présentée dans la figure 4.34 et détaillée dans l'annexe C.1. Dans tous les cas présentés dans cette section, le temps entre chaque véhicule est de 5 minutes. La définition retenue pour le calcul de l'énergie consommée par le réseau est identique à celle qui a été donnée dans la section précédente. Les cas retenus sont les suivants :

- Tous les véhicules n'ont pas de stockeur d'énergie
- 1 véhicule sur 4 est équipé d'un stockeur d'énergie
- 1 véhicule sur 2 est équipé d'un stockeur d'énergie
- 3 véhicules sur 4 sont équipés d'un stockeur d'énergie
- Tous les véhicules sont équipés d'un stockeur d'énergie

Dans la figure 4.34, le calcul de l'énergie est effectué pour un temps de 2600 secondes, les conditions d'exploitation des véhicules (nombre de passagers, temps d'attente à chaque station, puissance des auxiliaires,...) et les caractéristiques de l'alimentation électrique du réseau sont identiques aux cas présentés dans les sections précédentes.

Suite à la figure 4.34, la dépendance entre la réduction de la consommation d'énergie du réseau de transport et la proportion de véhicules ayant un stockeur d'énergie embarqué est linéaire.

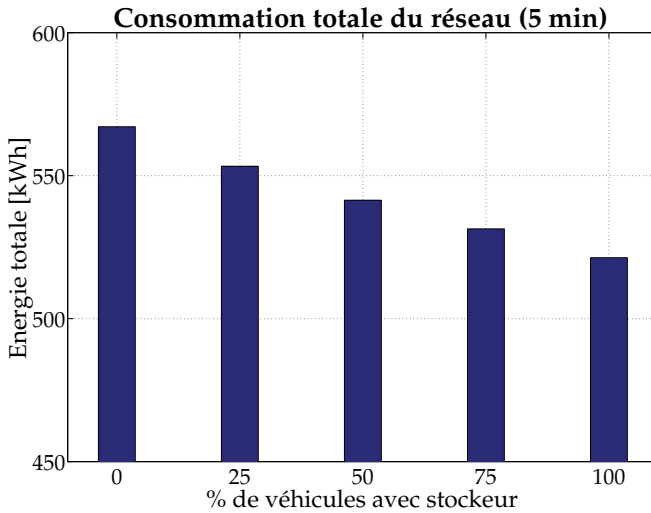


FIG. 4.34 – Energie totale en fonction de la part de véhicules avec stockeur sur le réseau

4.10.4 Variation du poids à vide des véhicules

La figure 4.35 présente la consommation du réseau de transport complet en fonction du poids à vide des véhicules. Tous les autres paramètres concernant le réseau de transport sont identiques aux cas présentés dans les sections précédentes et le temps entre chaque véhicule est de 5 minutes. La définition de la consommation énergétique du réseau est identique à celle qui a été donnée dans les sections précédentes et est effectuée sur un temps de 2600 secondes. Quatre différents cas pour la masse à vide des véhicules sont retenus dans cette section et la réduction de poids est appliquée à tous les véhicules circulant sur le parcours. Le premier cas retenu correspond à l'exploitation de véhicules standards, c'est-à-dire à ceux qui circulent actuellement sur la ligne étudiée. Les autres cas correspondent à une réduction de 2, 4 et 6 tonnes du poids à vide par rapport au cas de référence. Les résultats détaillés de ces différents cas sont donnés dans l'annexe C.2.

Une diminution du poids à vide de 16 % (6 tonnes) de chaque véhi-

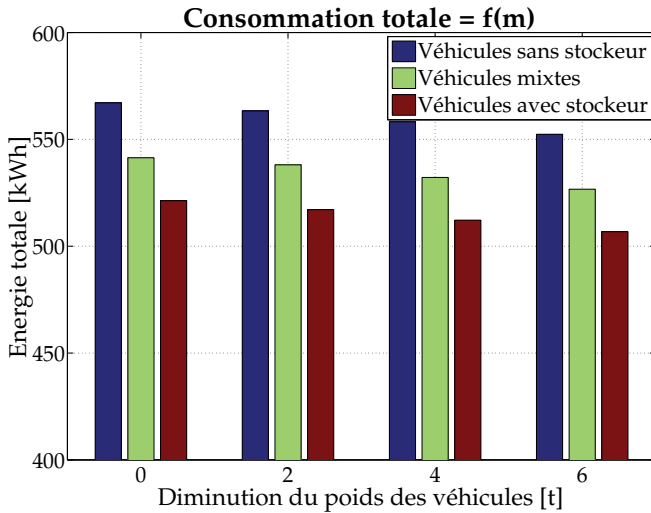


FIG. 4.35 – Energie totale consommée par le système en fonction du poids à vide des véhicules

culé circulant sur la ligne permet de diminuer de 2.6 % la consommation énergétique totale du réseau dans le cas où aucun véhicule n'est équipé d'un stockeur d'énergie. La diminution de la consommation est de 2.8 % lorsque chaque véhicule a un stockeur d'énergie embarqué.

La réduction de la consommation énergétique totale par l'ajout d'un système de stockage d'énergie dans chaque véhicule ou dans un véhicule sur deux n'est que faiblement dépendant de la masse à vide des véhicules. Ainsi, dans le cas où tous les véhicules sont équipés d'un stockeur d'énergie, la baisse de la consommation est de 8.1 % lorsque le poids à vide des véhicules est standard et de 8.3 % lorsque le poids à vide de chaque véhicule est réduit de 6 tonnes.

4.10.5 Variation de la puissance des auxiliaires

La puissance consommée par les auxiliaires de chaque véhicule est un critère important qui influence directement la consommation énergétique du réseau de transport. Dans tous les résultats précédents, la

consommation des auxiliaires est comptée comme étant une puissance constante de 30 kW prélevée durant la totalité du parcours. Par rapport à ce cas, la consommation énergétique du réseau est réduite de 23.1 % lorsque les véhicules ne consomment pas de puissance pour les auxiliaires et que les véhicules n'ont pas de stockeurs d'énergie embarqué. Les résultats détaillés de la consommation du réseau complet selon les définitions données dans les sections précédentes figurent dans l'annexe C.3 et sont représentés dans la figure 4.36. Les résultats sont donnés pour des valeurs de puissance des auxiliaires comprises entre 0 et 30 kW et pour un réseau de véhicules sans stockeur d'énergie, un réseau de véhicules mixtes et un réseau de véhicules avec stockeur d'énergie embarqué.

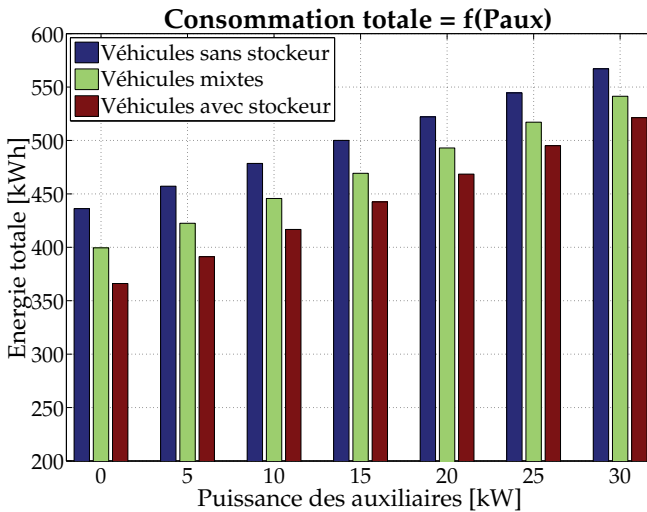


FIG. 4.36 – Energie totale consommée par le système en fonction de la puissance des auxiliaires des véhicules

La consommation énergétique du système croît de manière linéaire en fonction de la puissance des auxiliaires. Ainsi, pour un réseau de véhicules sans stockeurs d'énergie et dont la puissance pour les auxiliaires est nulle, 436.2 kWh sont consommés par le réseau. Pour le même type de véhicules, mais dont la puissance des auxiliaires de chaque véhicule est de 30 kW, la consommation associée est de 567.1 kWh. La dimi-

nution de la consommation énergétique est de 23.1 % entre le cas où les auxiliaires sont de 30 kW et le cas où ils sont de 0 kW. Cette différence est plus importante lors de l'exploitation de véhicules ayant un stockeur d'énergie embarqué; elle est de 29.8 %.

Lorsque la puissance des auxiliaires est de 30 kW, le remplacement de véhicules sans stockeur d'énergie par des véhicules avec un stockeur d'énergie permet de réduire la consommation énergétique complète du système de 8.1 %. La réduction de consommation est de 16.1 % lorsque la puissance des auxiliaires est de 0 kW. Ainsi, l'ajout d'un système de stockage d'énergie a un plus grand impact sur la baisse de la consommation énergétique du système lorsque la puissance des auxiliaires est faible. En effet, lors des phases de freinage, une grande part de la puissance des auxiliaires peut être directement prélevée sur la puissance de freinage. Ainsi, lorsque la puissance des auxiliaires est élevée, l'énergie dissipée dans les résistances de freinage et le potentiel de l'énergie pouvant être récupérée sont réduits.

4.10.6 Variation de la résistance linéique de la ligne

La puissance générée lors du freinage d'un véhicule peut être réinjectée sur la caténaire seulement si un autre consommateur peut absorber cette puissance. Ceci est vrai seulement si un autre consommateur se trouve à proximité de celui qui freine. Un des critères pour augmenter le rendement de ce transfert d'énergie est donné par la résistance linéique de la ligne. Dans le cas où elle est trop grande, seule une faible part de la puissance réinjectée par le véhicule qui freine peut être utilisée par l'autre consommateur, le solde de cette puissance est alors dissipée dans la résistance linéique des caténaires. La figure 4.37 présente la consommation du système complet telle que définie dans les sections précédentes pour trois cas de résistances linéiques différentes :

- Cas 1 : La résistance linéique est 4 fois plus grande que celle de la ligne de référence
- Cas 2 : La résistance linéique correspond à la résistance de la ligne de référence
- Cas 3 : La résistance linéique est 4 fois plus faible que celle de la ligne de référence

Dans les résultats présentés, tous les autres paramètres concernant les véhicules et la ligne sont identiques à ceux des sections précédentes.

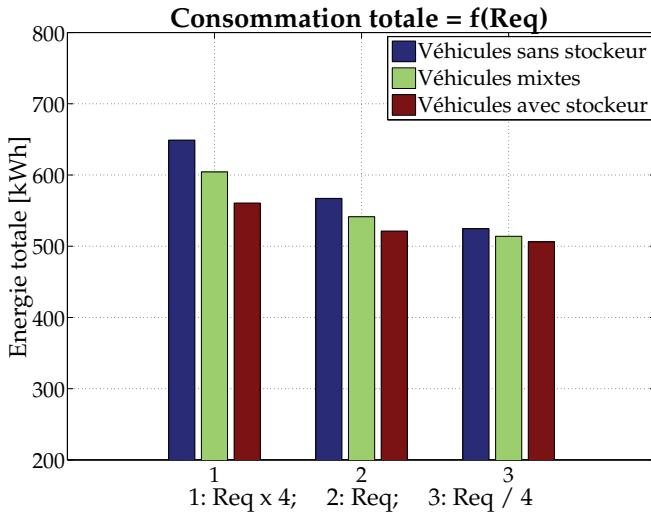


FIG. 4.37 – Energie totale consommée par le système en fonction de la résistance de ligne

L'énergie est calculée pour une période de 2600 secondes et l'intervalle de temps entre chaque véhicule est de 5 minutes. Les résultats détaillés sont donnés dans l'annexe C.4.

La consommation pour un réseau de véhicules sans stockeur d'énergie est de 649 kWh pour une résistance de caténaire élevée (cas 1) et est de 524.5 kWh lorsque la résistance de ligne est faible (cas 3). La diminution de la consommation énergétique est de 19.2 % entre ces deux cas pour un véhicule standard. Il en découle que la qualité de la caténaire, représentée par sa résistance linéique, est un facteur important pour garantir un bon rendement d'un réseau de véhicules alimentés par caténaire. Une diminution de la résistance de ligne peut être atteinte soit en augmentant la section de la caténaire, soit en changeant le type de matériel utilisé.

Dans le cas où la résistance de ligne est élevée, représenté dans le cas 3, la diminution de la consommation du réseau par l'introduction de véhicules munis d'un stockeur d'énergie embarqué est de 13.6 %. Cette diminution de consommation est de 3.5 % lorsque la résistance

de ligne est faible (cas 1). Ainsi, lorsqu'un réseau de transport a une résistance de ligne faible, le gain qu'il est possible d'atteindre en ajoutant un système de stockage d'énergie embarqué est faible. En effet, dans ce cas, la puissance de freinage des véhicules peut être utilisée de manière efficace par les autres consommateurs du réseau.

4.11 Conclusion

Ce chapitre présente une étude concernant l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué dans les véhicules pour un réseau de transport alimenté par caténaire. La réduction de la consommation énergétique du système complet véhicules-caténaires-sous-stations dans ce cas y est également caractérisée.

Dans un réseau de transport par caténaire standard, l'énergie de freinage des véhicules peut être réinjectée dans la caténaire lorsque des véhicules modernes sont utilisés. Dans ce cas, les moteurs de traction sont utilisés en mode génératrice. Toutefois, dans la pratique moins de 50 % de l'énergie de freinage théoriquement exploitable est réutilisée dans le réseau. Ceci est dû au fait que les conditions requises pour pouvoir réinjecter cette énergie de manière efficace sont rarement remplies simultanément. Il est notamment nécessaire que la distance entre un autre consommateur et le véhicule qui freine soit faible et que cet autre consommateur puisse absorber cette puissance instantanée.

Un stockeur d'énergie embarqué dans un véhicule permet non seulement de récupérer l'énergie de freinage de manière optimale, mais également de pouvoir exploiter le véhicule sur de courts parcours (500 - 1000 mètres) sans caténaire. Ainsi, certains lieux touristiques ou historiques peuvent être préservés de toute atteinte au paysage due à la construction de caténaires.

Le système de stockage d'énergie est connecté selon une configuration parallèle dans le véhicule. Ainsi, le rendement énergétique du véhicule est plus élevé et en cas de défaillance du système de stockage d'énergie, le véhicule peut continuer à avancer en prélevant l'énergie nécessaire directement sur la caténaire.

Dans le but de pouvoir mettre en avant les bénéfices concernant la baisse de la consommation énergétique du réseau de transport lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie

embarqué dans les véhicules, un logiciel de simulation a été développé dans ce chapitre. Il modélise tous les composants mécaniques et électriques des véhicules, les caténaires et les sous-stations. Les interactions entre les véhicules sont également modélisées dans ce simulateur.

L'exemple d'application retenu dans ce chapitre concerne l'étude d'une ligne de trams située à Mannheim, Allemagne. Toutefois, les outils et méthodes développés dans ce chapitre peuvent être utilisés pour tout autre type de véhicules, par exemple des trains, des métros ou des trolleybus et pour toute autre ligne alimentée par caténaire.

La diminution de la consommation totale du réseau complet de transport lors de l'exploitation d'un seul véhicule sur la ligne est de 18 %. Lorsque les véhicules se suivent à intervalles de 5 minutes sur la ligne, la diminution de la consommation totale d'énergie n'est que de 8 %. Différents paramètres ont été étudiés pour déterminer leur relation avec la consommation énergétique du réseau. De ces paramètres, un est très important et concerne la puissance absorbée par les auxiliaires. En effet, si cette puissance est élevée, un système de stockage d'énergie embarqué ne permet pas de réduire la consommation énergétique du réseau de manière significative.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent une forte dépendance entre le potentiel de réduction de la consommation énergétique et le nombre de véhicules sur la ligne. Comme ce nombre de véhicules varie fortement entre les heures de pointe et les heures creuses, une étude énergétique globale devrait être réalisée pour évaluer les bénéfices énergétiques sur des journées complètes voire sur un cycle hebdomadaire.

Ce chapitre a étudié le cas où le stockeur d'énergie est embarqué à bord du véhicule. Dans une étude future, l'augmentation du rendement énergétique du système sous-stations, caténaires et véhicules devrait être réalisée en considérant que le stockeur d'énergie n'est pas embarqué dans les véhicules, mais est connecté de manière fixe à la caténaire. Ce principe est présenté dans [46].

Chapitre 5

Un véhicule diesel-électrique

5.1 Introduction

L'étude d'un système d'assistance en puissance dédié à un réseau de véhicules alimentés par caténaire a été donnée dans le chapitre 4. Les principales caractéristiques du parcours de référence étaient les suivantes : courte distance entre chaque arrêt et très faible dénivellation. Ce chapitre présente un second cas d'application où un système d'assistance en puissance est ajouté dans un véhicule de type diesel-électrique et où la déclivité sur le parcours est importante.

Une automotrice articulée a été retenue comme exemple d'application dans ce chapitre, mais les méthodes et outils développés peuvent être appliqués à tout autre type de véhicules diesel-électrique.

Par rapport à un réseau de véhicules alimentés par caténaire, un réseau exploitant des véhicules diesel-électrique a un rendement plus faible. Premièrement, dans le cas d'un véhicule alimenté par caténaire, une partie de la puissance de freinage peut être réinjectée sur la caté-

naire et valorisée dans un autre véhicule alors que dans le cas d'un véhicule diesel-électrique, toute cette puissance de freinage est dissipée sous forme de chaleur. Deuxièmement, le rendement énergétique d'un moteur diesel accouplé à une génératrice est faible par rapport à d'autres méthodes de production de l'énergie électrique pouvant être utilisées dans un réseau alimenté par caténaire.

En plus de ne pas pouvoir récupérer l'énergie de freinage dans des véhicules de type diesel-électrique standard, un autre inconvénient résulte du fait que la puissance délivrée par le moteur diesel est directement transmise aux roues car il n'y a aucun tampon d'énergie embarqué. Le moteur diesel fonctionne donc très rarement dans sa plage de fonctionnement à rendement énergétique élevé. Cela se traduit par une augmentation de la consommation énergétique et des rejets polluants dans l'atmosphère par rapport au cas où il est exploité en permanence dans sa plage optimale.

Malgré ces différents désavantages, des véhicules de type diesel-électrique sont préférés par rapport à des véhicules alimentés par caténaire pour certaines applications. Dans le domaine ferroviaire, ce choix peut être fait par exemple lorsque l'impact sur le paysage doit être limité ou que le potentiel de voyageurs est faible. En effet, l'absence de caténaire permet de limiter les impacts sur le paysage. Bien que les coûts d'exploitation d'un véhicule utilisant du carburant comme source d'énergie primaire soient plus élevés que ceux d'un véhicule alimenté par un réseau électrique, l'investissement qui doit être fait pour l'infrastructure fixe est plus faible. En effet, le coût d'achat du carburant est plus élevé que celui de l'énergie électrique mais l'utilisation d'un véhicule diesel-électrique ne nécessite pas la construction de sous-stations et de caténaires.

Le système d'assistance en puissance qui est proposé dans ce travail consiste à ajouter un stockeur d'énergie embarqué dans le véhicule. Par une commande appropriée, il est possible de découpler le fonctionnement du moteur diesel des roues. Le moteur diesel peut donc être exploité en permanence dans sa plage de rendement optimum. Dans le cas optimal, le moteur diesel est utilisé pour fournir la puissance moyenne de traction et le stockeur d'énergie pour couvrir toutes les excursions de puissance par rapport à cette puissance moyenne. Le moteur à combustion n'a donc plus besoin d'être dimensionné pour fournir les pointes de courant lors des accélérations, mais seulement la puissance moyenne nécessaire

au véhicule. Un “downsizing” du moteur diesel peut être fait, sa taille est ainsi diminuée.

Un parcours type lié à l'exploitation d'automotrices diesel-électrique est retenu dans ce chapitre. Il sert de référence lors de tous les calculs présentés, mais les mêmes méthodes et concepts peuvent être appliqués à n'importe quel autre type de trajet. Le parcours de référence se situe dans une zone touristique montagneuse, où l'impact sur le paysage doit être limité et dont le potentiel de voyageurs est réduit.

Le parcours de référence présente une longue montée puis une longue descente pour rejoindre le point de départ. Un grand nombre d'arrêts sont situés sur la totalité de ce parcours. Suite au dimensionnement optimal qui a été défini dans le chapitre 2, la puissance moyenne nécessaire pour le véhicule varie fortement entre la montée et la descente. Dans le cas présenté dans ce chapitre, le stockeur n'est pas dimensionné selon un critère accélération-freinage, mais en prenant en compte le parcours complet. Ainsi, l'énergie qui est dissipée lors de la descente est stockée et est utilisée lors de la montée suivante. Le gain sur la consommation énergétique peut ainsi être augmenté.

5.2 Définition d'un parcours de référence

Un parcours de référence pour l'exploitation d'un véhicule diesel-électrique sur une voie ferrée est défini dans cette section. Ce parcours est utilisé comme base de calcul pour caractériser la réduction de la consommation énergétique d'un véhicule diesel-électrique lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance dans un véhicule standard de type diesel-électrique.

Le parcours retenu correspond à un cas d'utilisation typique de véhicules diesel-électrique. Cette situation se retrouve notamment dans les cas suivants pour des véhicules circulant sur des rails :

- Parcours touristiques. Dans ce cas, les impacts sur le paysage sont réduits car la ligne n'a pas besoin de caténaires.
- Parcours avec un potentiel de voyageurs réduit. Dans ce cas, la rentabilité de la ligne est faible ; le coût de l'infrastructure fixe est plus faible que dans le cas d'un système d'alimentation par caténaire. En effet des caténaires et des sous-stations ne doivent pas être construits.

Une application typique où ces deux critères se trouvent réunis est le chemin de fer de montagne. Dans ce cas, l'impact sur le paysage est un facteur important lors de la construction de la ligne et le potentiel de voyageurs est souvent limité ou n'a de justification que sur une courte période de l'année.

Le parcours de référence retenu se situe dans le Val Venosta et s'étend entre les localités de Merano et Malles. Il se situe dans une région montagneuse au nord de l'Italie.

Le trafic sur cette ligne a été complètement abandonné en 1991 suite à une décision des chemins de fer italiens (FS) et, par la suite, la province de Bolzano a décidé de la remettre en service pour les besoins en transports régionaux et pour compléter l'offre touristique. Pour la remise en service de cette ligne en 2005, la totalité du matériel roulant a été renouvelée. Le choix a été fait d'exploiter des automotrices articulées de type GTW-2 2/6 construits par l'entreprise Stadler Rail AG, Suisse, alimentées par des moteurs diesel.

Le parcours de référence a une dénivellation d'environ 800 mètres entre les deux stations terminus, une longueur de 61 kilomètres, est parcouru en 1 heure environ et est composé des sections suivantes :

- Pause de 1000 secondes (0-1000 secondes)
- Trajet Malles-Merano pour un véhicule en trafic direct (1000-4621 secondes)
- Pause de 1000 secondes (4621-5500 secondes)
- Trajet Merano-Malles pour un véhicule en trafic direct (5500-9158 secondes)
- Pause de 1000 secondes (9158-10200 secondes)
- Trajet Malles-Sondrio pour un véhicule en trafic régional (10200-13025 secondes)
- Pause de 1000 secondes (13025-14320 secondes)
- Trajet Sondrio-Malles pour un véhicule en trafic régional (14320-16148 secondes)

Le temps des pauses est défini à 1000 secondes dans le but de permettre aux passagers de descendre et de monter dans le véhicule et de préparer l'automotrice pour le trajet suivant. Le choix de ce parcours est retenu dans ce chapitre car il présente une grande diversité pour

les contraintes appliquées aux moteurs de traction et il est une image caractéristique de l'utilisation quotidienne d'un véhicule sur ce parcours.

Les figures 5.1, 5.2 et 5.3 représentent les caractéristiques du parcours retenu.

La figure 5.1 représente l'altitude du véhicule en fonction du temps pour le parcours de référence. Le profil de vitesse est donné dans la figure 5.2. Il est possible de voir sur ce graphe le grand nombre de phases accélération-freinage typiques de l'exploitation d'un véhicule en trafic régional. La figure 5.3 représente le profil de l'accélération sur ce parcours où chaque freinage est caractérisé par une forte accélération négative.

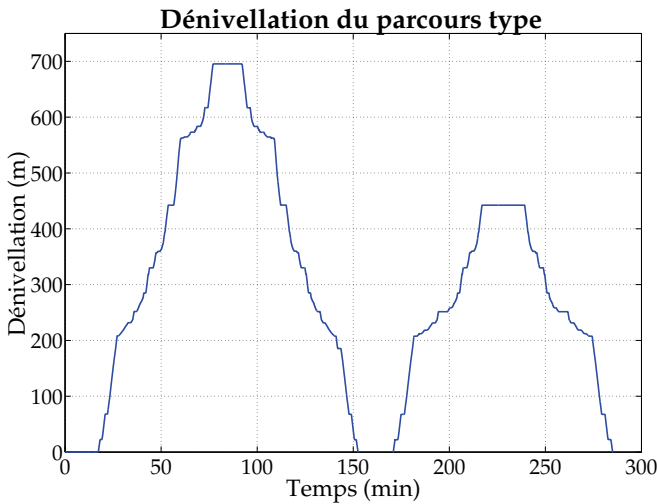


FIG. 5.1 – Dénivellation du parcours de référence

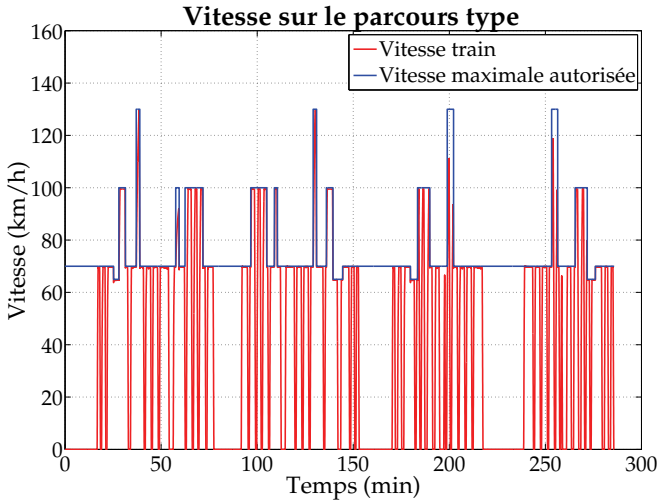


FIG. 5.2 – Vitesse du véhicule sur le parcours type

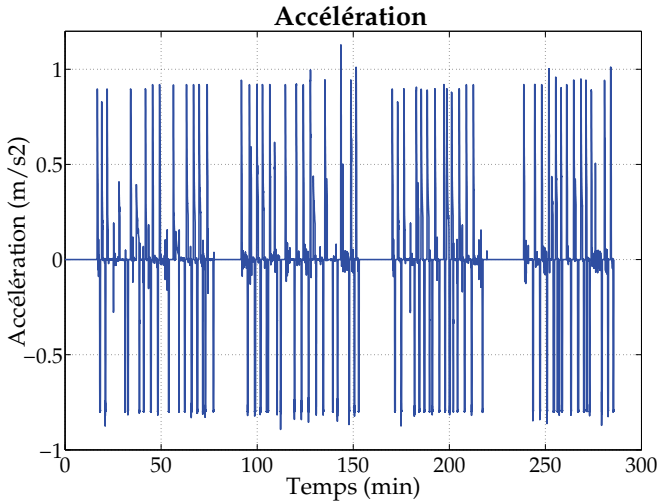


FIG. 5.3 – Accélération du véhicule sur le parcours type

5.3 Caractéristiques du véhicule

Le véhicule de référence utilisé comme base de calcul dans ce chapitre correspond au matériel roulant exploité sur la ligne de référence. Il est fabriqué par l'entreprise Stadler Rail AG, Suisse et le type de modèle est GTW-2 2/6. Ce type d'automotrice articulée fait partie de la seconde génération de véhicules de type GTW fabriqués par cette entreprise dont le concept est d'être facilement adaptable au choix du client. Par exemple, ils peuvent être propulsés par des moteurs électriques ou des moteurs diesel ; la puissance peut être adaptée facilement à chaque ligne et le nombre de wagons peut également être modulé. Bien que le choix est fait d'utiliser ce véhicule comme référence dans ce chapitre, les concepts et méthodes de calculs définis peuvent être appliqués à tous autre type de véhicule diesel-électrique.

Pour la ligne de référence, la puissance de traction est fournie par deux moteurs diesel de 380 kW chacun. Ceci permet d'atteindre une accélération maximale de 1.03 m/s^2 pour le véhicule complet. Les caractéristiques détaillées du véhicule de référence sont données dans le tableau 5.1.

Le véhicule de référence est constitué de deux wagons et d'un module central qui contient tous les composants de la chaîne de traction. Le schéma de l'automotrice utilisée sur la ligne de référence est donné dans la figure 5.4. La figure 5.5 montre une photo de ce véhicule.

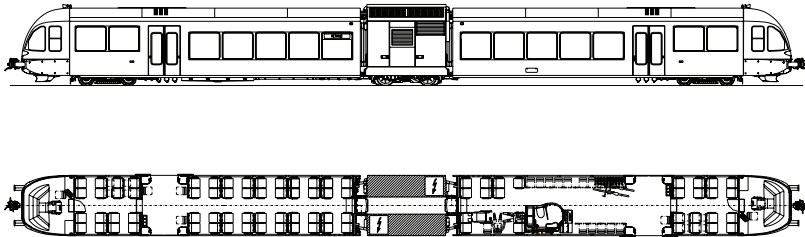


FIG. 5.4 – Schéma du véhicule de référence

La figure 5.6 représente les flux d'énergie dans un véhicule diesel électrique standard. La source d'énergie primaire, du carburant dans ce cas, est utilisée pour alimenter deux moteurs diesel connectés à deux génératrices de type asynchrone. L'énergie électrique est ensuite convertie

5.3. Caractéristiques du véhicule

Mécanique :	
Ecartement des voies :	1 435 mm
Types d'axes :	2' Bo 2'
Hauteur du plancher :	Bas : 585 mm Haut : 1 000 mm
Dimensions du véhicule :	Longueur : 39 300 mm Largeur : 3 000 mm Hauteur : 3 850 mm
Poids total à vide :	67 t
Poids total en charge :	84 t
Capacité :	
Nombre de places assises :	110
Nombre de places debout :	120 (4 personnes par m ²)
Nombre total de places :	230
Dynamique :	
Puissance des moteurs diesel :	760 kW (2 x 380 kW)
Puissance maximale disponible aux roues :	620 kW
Force maximale fournie :	80 kN
Accélération maximale :	1.03 m/s ²
Vitesse maximale :	140 km/h
Force de freinage max des freins électriques :	60 kN

TAB. 5.1 – Caractéristiques du véhicule GTW utilisé sur la
ligne Merano-Malles



FIG. 5.5 – Photo du véhicule de référence

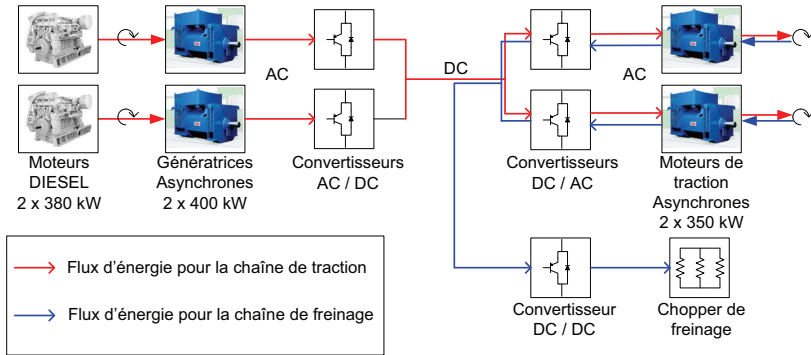


FIG. 5.6 – Flux d'énergie dans le véhicule de référence

par des convertisseurs statiques en une tension continue. Cette tension correspond à la tension du bus continu du véhicule. Lors des phases d'accélération, la puissance de propulsion est directement prélevée sur le bus à tension continue à travers deux convertisseurs statiques alimentant les moteurs de traction asynchrones. La chaîne de traction ne comportant pas d'éléments stockeurs d'énergie, la puissance délivrée par le moteur diesel est une image de la puissance des roues. Ainsi, le moteur diesel n'est pas exploité dans sa plage de meilleur rendement bien que le système puisse être utilisé avec une vitesse de rotation variable des génératrices. Lors des phases de freinage, les moteurs de traction fonctionnent en mode génératrice et réinjectent l'énergie de freinage sur le bus à tension continue. Comme il n'y a pas d'éléments stockeurs d'énergie embarqué dans le véhicule, l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur dans des résistances de freinage.

Les différents flux d'énergie à bord du véhicule sont définis dans la figure 5.7. Dans cette figure, les échelles entre les différentes puissances ne sont pas respectées. Le haut de la figure symbolise l'énergie de type mécanique délivrée par le moteur diesel et le bas de cette figure représente l'énergie des moteurs de traction (consommée durant les accélérations et récupérée lors des freinages). L'énergie dissipée sous forme de chaleur lors des phases de freinage se situe sur la partie gauche de la figure. Toutes les pertes sur la chaîne de traction figurent dans cette figure.

La figure 5.7 montre bien que la totalité de l'énergie de freinage est

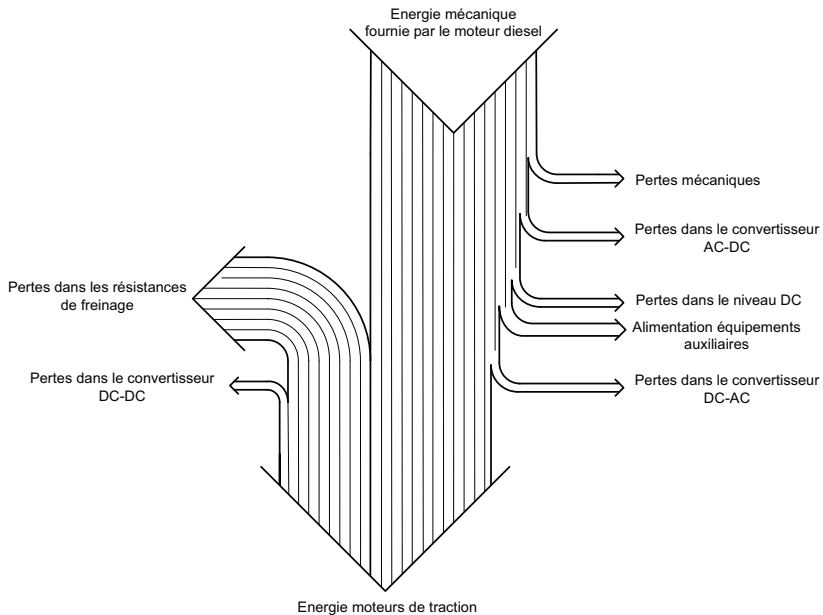


FIG. 5.7 – Gestion énergétique à bord du véhicule de référence

dissipée sous forme de chaleur car le système ne comporte pas d'élément permettant de stocker cette énergie. De plus, il est possible de voir sur cette figure que la dissipation de l'énergie de freinage correspond à la plus grande perte énergétique dans le véhicule (sans tenir compte du rendement lors de la combustion dans le moteur diesel). La suite de ce chapitre est consacrée à l'étude d'une solution pour diminuer les pertes énergétiques lors des phases de freinage par l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué.

5.4 Mesure des puissances

La puissance nécessaire aux moteurs de traction est déterminée pour le parcours de référence tel que défini dans le paragraphe 5.2. Le type de véhicule correspond au véhicule GTW-2 2/6 défini dans 5.3. La figure 5.8

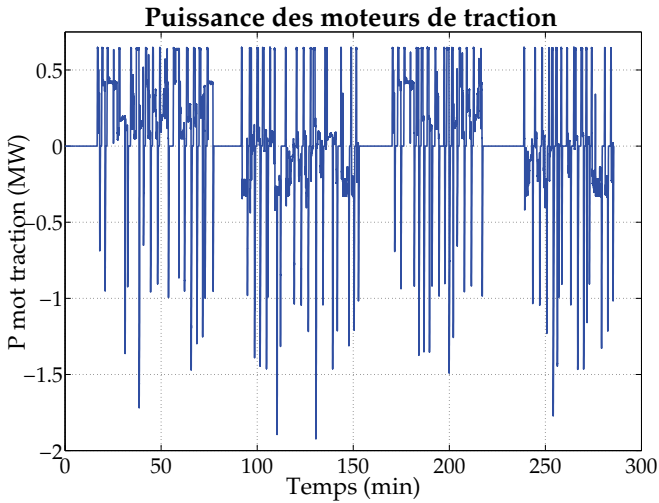


FIG. 5.8 – Puissance des moteurs de traction pour le parcours de référence

représente la puissance des moteurs de traction pour le parcours de référence.

La convention pour la représentation de la puissance sur les moteurs de traction est la suivante :

- Puissance positive : puissance utilisée par les moteurs de traction pour l'accélération
- Puissance négative : puissance régénérée sous forme électrique lors des freinages

La courbe de la puissance de traction donnée dans cette section ne correspond pas à une mesure faite sur le parcours de référence, mais à une simulation effectuée par le constructeur. Cette courbe de puissance est prise comme base de calcul pour tous les développements qui vont suivre dans ce chapitre. Les courbes dans ces figures représentent la puissance au niveau des moteurs de traction et ne prennent pas en compte la puissance des auxiliaires dans le véhicule. Dans la suite de ce chapitre, la puissance des auxiliaires est supposée nulle.

A partir de cette figure, l'énergie potentiellement récupérable lors

des phases de freinage est du même ordre de grandeur que l'énergie consommée par les moteurs de traction. Dans un véhicule de type diesel-électrique standard, toute l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur car elle ne peut pas être stockée à bord du véhicule. Le principe du système d'assistance en puissance présenté dans ce chapitre consiste à ajouter des éléments stockeur d'énergie embarqués dans le but de récupérer l'énergie de freinage et de la réinjecter dans le système de traction lors des accélérations suivantes.

5.5 Système d'assistance en puissance

La figure 5.9 représente le principe de fonctionnement du véhicule de référence tel qu'il est actuellement fabriqué pour la ligne Merano-Malles. Ce véhicule n'a pas la capacité de récupérer l'énergie de freinage. Cette énergie est totalement dissipée sous forme thermique dans des résistances de freinage placées sur le toit. Dans le but d'augmenter le rendement énergétique du système complet, un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué est ajouté. Le stockeur d'énergie retenu dans ce chapitre est de type supercondensateur, la justification de ce choix est donnée dans le chapitre 3.

La figure 5.10 montre les modifications à apporter au véhicule de référence pour ajouter la fonction de récupération de l'énergie de freinage. Les deux convertisseurs AC - DC et DC - AC représentés en noir sont identiques pour le véhicule de référence et pour celui qui a un système d'assistance en puissance. Le convertisseur DC - DC, représenté en rouge, assurant la gestion de la dissipation de l'énergie de freinage est remplacé par un convertisseur DC - DC, représenté en bleu, réversible en courant. Ce dernier convertisseur est utilisé pour assurer la gestion énergétique du stockeur. La modification la plus importante dans la structure du véhicule est le remplacement des résistances de freinage par des éléments stockeur d'énergie.

Lors d'une réalisation pratique, il n'est cependant pas possible de supprimer les résistances de freinage. En effet, le véhicule doit pouvoir utiliser les freins électriques dans tous les cas de fonctionnement, même lorsque le banc de supercondensateurs est complètement chargé. L'énergie électrique de freinage est alors dissipée de manière sûre dans les résistances de freinage.

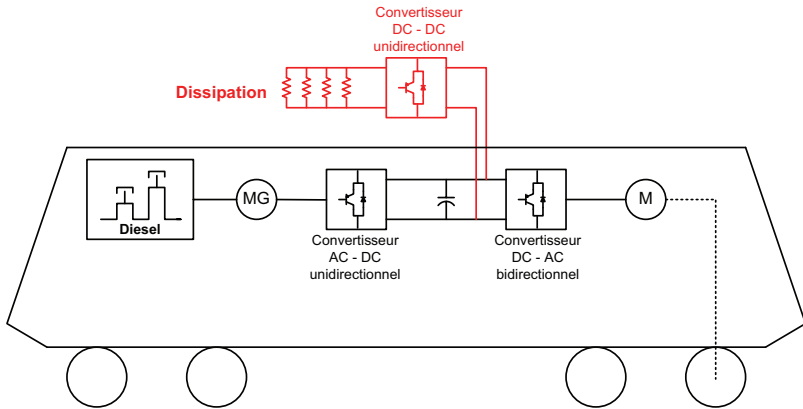


FIG. 5.9 – Schéma structurel du véhicule de référence

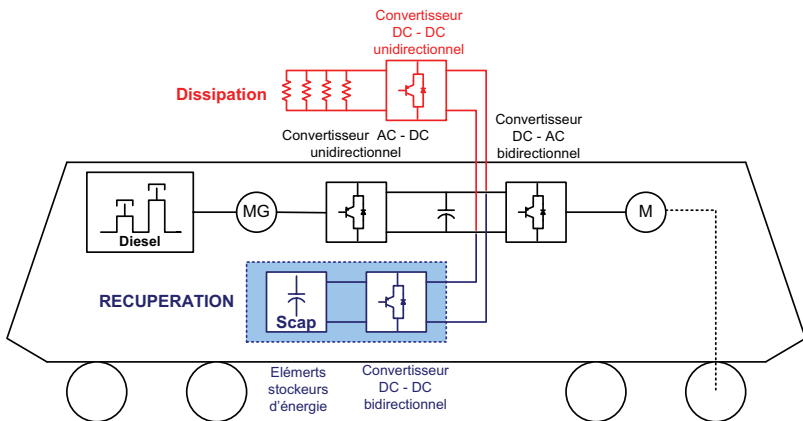


FIG. 5.10 – Schéma structurel du véhicule avec un système d'assistance en puissance

L'ajout d'un stockeur d'énergie à bord du véhicule permet de découpler le fonctionnement du moteur diesel du moteur de traction. L'énergie pour accélérer les roues peut dès lors provenir simultanément du moteur diesel et du système de stockage d'énergie. Ainsi, il est possible de diminuer la taille du moteur diesel tout en conservant les mêmes caractéristiques dynamiques (accélération, vitesse maximale,...) du véhicule.

5.5.1 Structure du branchement du stockeur d'énergie dans le véhicule

L'implémentation du banc stockeur d'énergie de type supercapacitif peut être réalisée selon deux configurations distinctes. Ces différentes solutions sont décrites dans les figures 5.12 (branchement du banc stockeur d'énergie selon une structure série) et 5.13 (branchement du banc stockeur d'énergie selon une structure parallèle). La structure du véhicule de référence est représentée dans la figure 5.11.

Branchement série du banc stockeur d'énergie

Cette solution consiste à connecter le banc de supercondensateurs en série par rapport au flux d'énergie principal de la chaîne de traction. Elle impose l'utilisation de 4 convertisseurs statiques. Un interfaçage entre

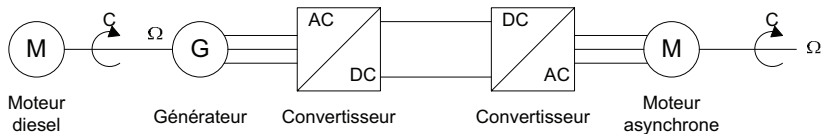


FIG. 5.11 – Schéma actuel de l'automotrice articulée GTW

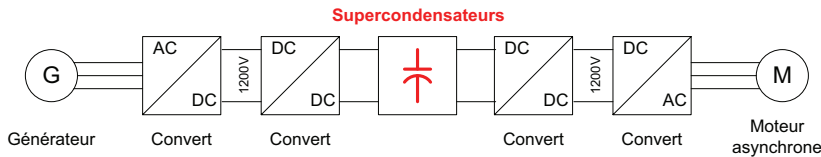


FIG. 5.12 – Branchement série du banc de supercondensateurs

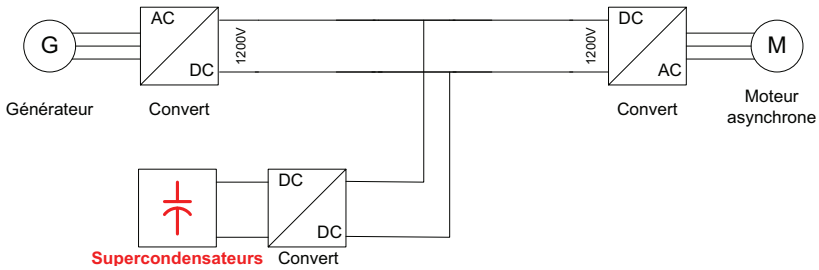


FIG. 5.13 – Branchement parallèle du banc de supercondensateurs

le niveau de tension variable aux bornes du banc de supercondensateurs et la tension continue présente sur le bus continu du véhicule est réalisé à l'aide de deux convertisseurs continu - continu placés respectivement en amont et en aval du stockeur d'énergie. Ces deux convertisseurs sont représentés en bleu dans la figure 5.12. Les autres convertisseurs AC-DC et DC-AC restent identiques à la solution actuelle du véhicule sans système de stockage d'énergie.

Il est à noter que pour un branchement de ce type, la totalité de l'énergie de traction traverse les 4 convertisseurs statiques. Les pertes énergétiques associées ne sont pas négligeables. Ainsi, plus le nombre de convertisseurs cascades est élevé, plus les pertes dans le système complet sont importantes. Le rendement d'un convertisseur est également une fonction du courant qui le traverse, et ainsi, plus le courant qui le traverse est élevé, plus les pertes sont importantes.

En plus du faible rendement du système, un autre désavantage de cette configuration est le manque de robustesse du véhicule avec un stockeur d'énergie embarqué. En effet, en cas de défaillance du système de stockage, le véhicule est totalement immobilisé. Ceci est dû au fait que la totalité de l'énergie nécessaire pour la traction doit transiter par les bornes du banc stockeur d'énergie. Une défaillance dans ce système de stockage est alors synonyme d'une ouverture dans la chaîne de transmission de l'énergie.

Branchement parallèle du banc stockeur d'énergie

Un branchement parallèle du banc stockeur à bord du véhicule impose l'utilisation de seulement 3 convertisseurs statiques. Le convertisseur qui doit être ajouté par rapport au véhicule de référence est représenté en bleu sur la figure 5.13. Ce convertisseur assure le rôle d'adaptation des niveaux de tension entre le banc de supercondensateurs (tension variable) et le bus de tension continue (tension constante). Ce convertisseur doit être bidirectionnel en courant afin d'assurer un flux d'énergie entrant et sortant du banc stockeur d'énergie.

Dans un cas de branchement parallèle, toute l'énergie nécessaire aux moteurs de traction ne transite pas au travers des trois convertisseurs statiques. En effet, une partie de l'énergie transite directement du moteur thermique au moteur de traction (à travers 2 convertisseurs) sans passage dans l'étage du stockeur. Le rendement énergétique du système global par rapport au branchement série (4 convertisseurs) est plus élevé car le rendement d'un convertisseur n'est pas idéal.

Ce type de branchement du banc stockeur offre une meilleure robustesse que le branchement série concernant une avarie au niveau du système de stockage d'énergie. En effet, le banc stockeur d'énergie peut être déconnecté de la chaîne de transmission de l'énergie et le moteur diesel alimente directement les moteurs de traction. Toutefois, le fonctionnement du système est dégradé car le système d'assistance en puissance lors des accélérations n'est plus présent, mais le véhicule peut rejoindre de manière autonome un lieu de réparation.

Choix retenu

Le choix retenu dans ce chapitre pour le branchement du banc stockeur d'énergie à bord du véhicule est la solution parallèle. Ce montage est adopté à cause du meilleur rendement énergétique et de la robustesse plus élevée du véhicule.

5.5.2 Régulation du système d'assistance en puissance

Le système de gestion de l'énergie à bord du véhicule à stockage d'énergie doit être complètement modifié par rapport à un véhicule stan-

dard diesel-électrique dans le but d'exploiter le banc stockeur d'énergie de manière optimale. Dans la structure retenue pour le branchement du banc stockeur d'énergie, les 3 convertisseurs statiques représentés dans la figure 5.13 doivent être régulés. Cette section présente une solution développée pour la régulation du convertisseur DC - AC de l'alimentation des moteurs de traction, du convertisseur AC - DC pour la régulation de la puissance prélevée sur la génératrice asynchrone et du convertisseur DC - DC gérant le flux d'énergie sur le banc stockeur d'énergie.

Le convertisseur DC - AC pour l'alimentation des moteurs de traction

La gestion des moteurs de traction est identique pour le véhicule à stockage d'énergie et le véhicule de type standard. Il n'est donc pas utile de présenter plus en détail la régulation de ce convertisseur. En effet, les contraintes sur les moteurs de traction restent identiques dans les deux cas et donc la puissance transitant dans le convertisseur DC - AC est similaire. Pour les simulations qui sont présentées dans la suite de ce chapitre, la courbe de puissance consommée par les moteurs de traction est celle qui a été fournie par le constructeur. Cette courbe est également la puissance qui transite dans le convertisseur DC - AC.

Le convertisseur AC - DC pour l'énergie prélevée sur la génératrice

Comme expliqué dans le début de ce chapitre, un des buts recherché est d'exploiter le moteur diesel en permanence dans sa plage de fonctionnement à meilleur rendement. Après analyse des abaques de consommation des moteurs diesel, sa plage de fonctionnement à meilleur rendement est trouvée lorsqu'il fonctionne à régime et puissance délivrée constants. Le couple produit par le moteur diesel est donc égal au couple maximal qu'il peut délivrer à cette vitesse de rotation.

Dans le but de faire fonctionner en permanence le moteur diesel à son meilleur rendement durant la totalité du parcours, son état de fonctionnement est soit arrêté, soit exploité à son régime optimal.

La régulation du flux d'énergie sortant de la génératrice se résume à déterminer les moments de fonctionnement du groupe moteur diesel - génératrice : marche ou arrêt. Ces états sont directement déterminés par

l'état de charge du stockeur d'énergie. En effet, lorsque le banc stockeur est proche de sa charge maximale, le moteur diesel peut être arrêté. Dans le cas contraire, où le banc est proche de sa décharge complète, le moteur diesel fournit l'énergie nécessaire pour recharger le banc stockeur d'énergie.

La puissance moyenne de traction a une grande différence si le véhicule est sur le parcours de montée ou sur le parcours de descente. Dans le but d'exploiter le stockeur d'énergie de manière optimale, les seuils d'enclenchement, respectivement de déclenchement du moteur diesel seront modifiés en fonction de la phase dans laquelle le véhicule se trouve. La stratégie suivie pour le fonctionnement du moteur diesel est la suivante :

- Etat de charge du banc supercapacitif élevé lors des phases de pause avant la montée et lors de la montée
- Etat de charge du banc supercapacitif bas lors de la phase d'arrêt au sommet et lors des phases de descente

Lors des montées, le fait d'utiliser un moteur diesel de taille réduite impose l'utilisation de l'énergie stockée pour garantir les mêmes performances dynamiques pour un véhicule avec un système d'assistance en puissance et un véhicule standard. L'état de charge du banc supercapacitif doit donc être suffisant pour répondre en tout temps à ces pics de puissance. Il en est de même lors de la pause avant la montée, où il est nécessaire d'adapter la charge du banc de supercondensateurs en vue de préparer la montée qui va suivre.

Le raisonnement est opposé lors des phases de descente et de pause avant la descente. En effet, la charge des supercondensateurs doit être maintenue à un niveau bas durant ces phases. Lors des descentes, le bilan énergétique global au niveau des moteurs de traction est négatif et la stratégie consiste à récupérer le maximum de cette énergie jusqu'à ce que le stockeur d'énergie soit complètement chargé.

Le convertisseur DC - DC pour la gestion de la charge et de la décharge du stockeur d'énergie

La stratégie suivie pour la régulation du fonctionnement du groupe moteur diesel - génératrice est de fournir de l'énergie en fonction de l'état de charge du banc stockeur supercapacitif. Toutes les variations de puissance nécessaire aux moteurs de traction ont donc un impact direct sur le courant de charge ou de décharge du banc stockeur d'énergie.

La tension sur le bus de tension continue du véhicule est une image des flux d'énergie dans le système du véhicule à récupération d'énergie. Ainsi, lors des phases de freinage, la tension sur ce bus augmente et lors des phases d'accélération, elle diminue ; lors des phases de fonctionnement du moteur diesel, elle augmente et lors de l'arrêt du moteur diesel, il n'y a pas d'effets sur la tension du bus continu.

La régulation de l'énergie transitant au travers du convertisseur DC - DC est donc le résultat d'une régulation de la tension sur le bus de tension continue de la locomotive. La structure du régulateur retenu pour le véhicule à stockage d'énergie est représentée dans la figure 5.14. Le régulateur pour régler le courant de charge ou de décharge du banc de supercondensateurs est de type proportionnel-intégral.

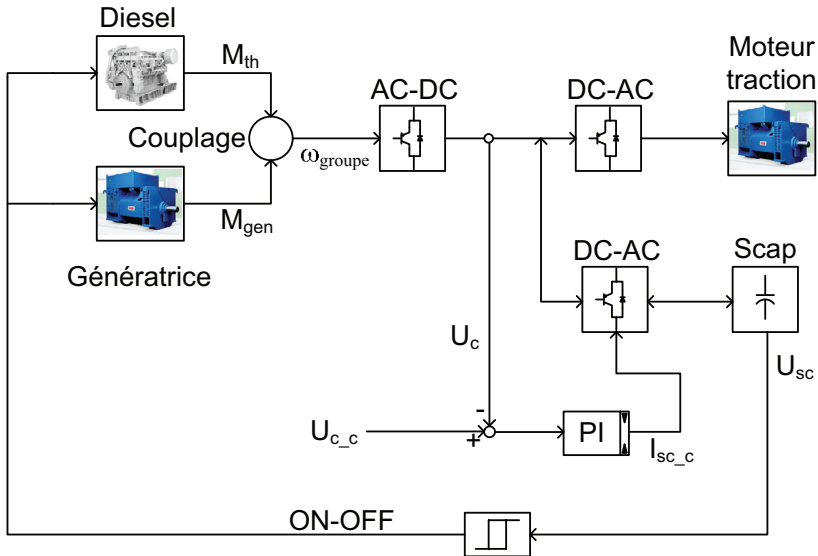


FIG. 5.14 – Régulation pour le système d'assistance en puissance

Les résistances de freinage

Le rôle des résistances de freinage a été expliqué dans la section 5.5. Ce dispositif est utilisé comme élément de sécurité pour le véhicule. Ainsi, lorsque le stockeur d'énergie est complètement chargé, le système de freinage électrodynamique fonctionne de manière optimale et le surplus d'énergie présent au niveau du banc stockeur est dissipé sous forme de chaleur. Cette dissipation est effectuée par des résistances de freinage, de manière identique à celles qui sont utilisées dans un véhicule standard.

Le système de dissipation de l'énergie de freinage est régulé en fermant (respectivement en ouvrant) le circuit résistif connecté aux bornes du banc supercapacitif. Cette commande est directement déterminée à partir de la mesure de la tension aux bornes du stockeur d'énergie.

5.6 Dimensionnement du banc de supercondensateurs

Les différentes modifications de la structure du véhicule de référence pour assurer la fonction de récupération de l'énergie de freinage ont été présentées dans le paragraphe 5.5. Cette section présente les modifications sur les contraintes appliquées sur le moteur diesel lors de l'ajout d'un stockeur d'énergie embarqué dans le véhicule. La seconde partie de cette section présente une méthode de dimensionnement du nombre nécessaire de supercondensateurs.

5.6.1 Modification des contraintes sur le moteur diesel

L'ajout d'un élément stockeur d'énergie à bord du véhicule modifie les contraintes imposées au moteur diesel. En effet, lors des phases d'accélération, la puissance fournie par le stockeur d'énergie permet de réduire les contraintes en puissance sur le moteur diesel. Les pics de puissance consommée par le moteur de traction ne sont ainsi plus fournis par le moteur diesel mais par le stockeur d'énergie. Il est dès lors possible de remplacer le moteur diesel par un autre de plus faible puissance. Cette limitation des contraintes sur le moteur diesel est appelée

lissage et la diminution du moteur diesel "downsizing". Il convient de distinguer deux types de lissages différents :

- accélération - freinage
- montée - descente

Lissage accélération-freinage

Le parcours de référence retenu dans ce chapitre présente un grand nombre de phases démarrage - freinage réparties sur la totalité du parcours. Ce comportement est typique d'un véhicule utilisé pour le trafic régional. La puissance des moteurs de traction ainsi que la vitesse du véhicule entre deux arrêts sont représentés dans la figure 5.15.

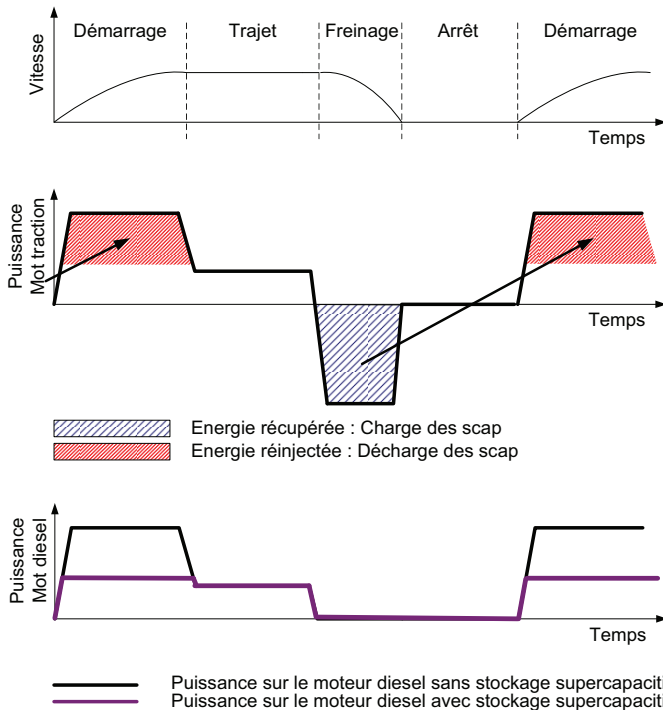


FIG. 5.15 – Lissage des puissances accélération - freinage 1

Sur la figure 5.15, la convention est prise que l'alimentation des moteurs de traction est comptée positivement et celle correspondant au freinage est comptée négativement. La courbe noire (figure du milieu) correspond aux variations de la puissance aux bornes du moteur de traction. Dans le cas du véhicule sans stockeur d'énergie, la partie positive de cette puissance correspond à celle qui est fournie par le moteur diesel.

Sur cette même figure (graphique du bas), la puissance que doit fournir le moteur diesel est représentée en noir pour le véhicule de référence. Cette puissance est la même que celle qui se trouve sur les moteurs de traction, sauf pour les phases de freinage où la totalité de la puissance de freinage est dissipée sous forme de chaleur. Pour simplifier les représentations des courbes dans ces figures, les rendements des différents convertisseurs sont supposés unitaires.

L'énergie dissipée lors des phases de freinage dans le véhicule de référence est représentée par la surface hachurée en bleu. Dans le cas du véhicule à récupération d'énergie, cette énergie est récupérée, puis réinjectée dans le système de traction lors des phases suivantes d'accélération. L'énergie récupérée (surface hachurée en bleu) est ainsi "transférée" pour couvrir les besoins de la prochaine accélération (surface rouge). Ainsi, les contraintes en puissance sur le moteur diesel avec le stockage supercapacitif sont réduites. La courbe de puissance qui en résulte est représentée en violet.

La puissance fournie par le moteur diesel ne présente plus les forts pics lors des phases d'accélération. Toutefois, il est possible d'étendre la réflexion concernant la gestion de l'énergie dans le véhicule. En effet, le moteur diesel peut fonctionner lors des phases de freinage et d'arrêts du véhicule. Dans ce cas, la taille du moteur diesel peut à nouveau être réduite car la puissance moyenne fournie par ce dernier sur le parcours est plus faible.

La figure 5.16 représente les variations de puissance aux bornes des moteurs de traction et diesel avec le deuxième lissage proposé pour les phases accélération - freinage. L'énergie de freinage récupérée (surface en bleu foncé) est toujours réinjectée dans le système de traction lors de la phase suivante d'accélération (surface rouge). Ce qui change est le fait que le moteur diesel fonctionne lors du freinage et de l'arrêt du véhicule. L'énergie ainsi produite (surface représentée en vert) est stockée puis réinjectée dans le système de traction lors des phases d'accélération et durant le trajet (énergie représentée en bleu clair). L'énergie produite

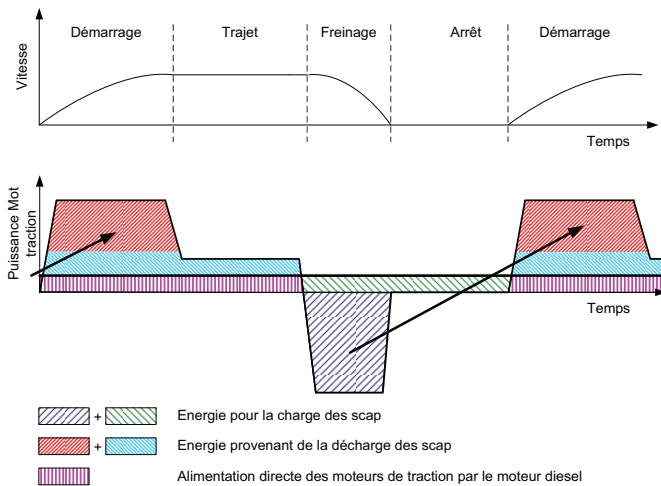


FIG. 5.16 – Lissage des puissances accélération - freinage 2

par le moteur diesel lors des phases d'accélération et durant le trajet à vitesse constante (surface représentée en rose) est directement injectée dans les moteurs de traction sans passage au travers du banc stockeur d'énergie.

La puissance qui est délivrée suite à ces deux méthodes de lissage par le moteur diesel est constante durant chaque phase (montée et descente) du parcours de référence. Dans ce cas, toute puissance demandée par le moteur de traction qui dépasse la puissance maximale du moteur diesel est fournie par le stockeur d'énergie. Inversement, chaque fois que la puissance des moteurs de traction est inférieure à la puissance du moteur diesel, l'énergie excédentaire est utilisée pour la recharge du stockeur d'énergie.

Ainsi, il est possible d'utiliser un moteur diesel avec une plus petite puissance maximale tout en ayant les mêmes performances dynamiques pour le véhicule (c'est-à-dire accélération, vitesse maximale, distance de freinage, etc). Les avantages liés à l'utilisation d'un moteur diesel plus petit et de la récupération de l'énergie de freinage sont les suivants : la consommation finale de carburant est plus faible, il y a moins de rejets polluants dans l'atmosphère, etc. Le seul désavantage du système à

récupération d'énergie de freinage est le fait que la masse du véhicule augmente en raison de l'ajout du stockeur d'énergie. Une méthode de dimensionnement de ce stockeur d'énergie est présentée dans la deuxième partie de ce chapitre.

Lissage montée-descente

Le lissage accélération - freinage présenté dans la section précédente permet de lisser la demande en puissance au niveau du moteur diesel lors d'un trajet compris entre deux arrêts. Cette section présente une vision globale, c'est-à-dire un cycle complet de fonctionnement du véhicule sur le parcours de référence.

Il est évident que la puissance moyenne délivrée par le moteur diesel (définie dans le cas du lissage accélération - freinage) n'est pas égale dans le cas de montée ou de descente du véhicule. En effet, les phases d'accélération en montée nécessitent une forte énergie alors que les phases de freinage ne permettent de récupérer qu'une faible quantité d'énergie. Dans le cas d'une descente, l'énergie nécessaire lors des phases d'accélération est faible et l'énergie qu'il est possible de récupérer est importante.

Dans le but de lisser au maximum la puissance délivrée par le moteur diesel par l'ajout d'un stockeur d'énergie, il est possible d'effectuer un lissage de la puissance sur les phases montée - descente. La figure 5.17 représente le concept de ce lissage. La puissance fournie par le moteur diesel après le lissage accélération - freinage 2 y est représentée par la courbe noire.

Dans le cas du lissage montée - descente, le moteur diesel ne couvre

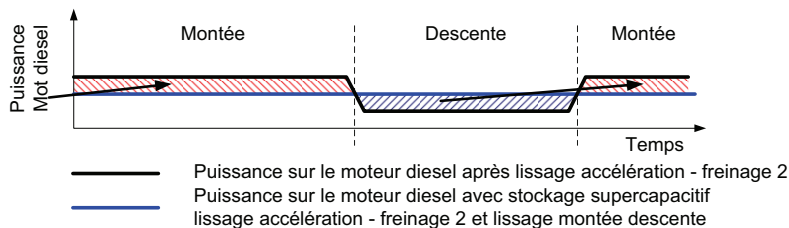


FIG. 5.17 – Lissage montée - descente

pas les besoins en puissance lors des phases de montée et produit trop d'énergie lors des phases de descente. Ainsi, l'énergie représentée par la surface hachurée en bleu (excédentaire lors des descentes) est stockée dans le stockeur d'énergie et est réinjectée dans le système de propulsion pour couvrir le manque en énergie lors des phases de montée (surface hachurée en rouge). Suite à ce lissage, la puissance délivrée par le moteur diesel est représentée par la courbe violette. Cette puissance est constante sur le totalité du parcours de référence.

Une des conséquences liée à ces différents lissages est de pouvoir utiliser un moteur diesel de plus faible puissance tout en conservant les mêmes caractéristiques dynamiques du véhicule (accélération, vitesse maximale, etc). De plus, il est possible de dimensionner le moteur diesel nécessaire pour le faire fonctionner en permanence dans sa plage de meilleur rendement (régime et puissance). Ainsi, le rendement final du véhicule à stockage d'énergie est meilleur et les émissions polluantes sont réduites. Toutefois, le poids du véhicule est plus élevé que dans le cas du véhicule de référence ; voir le chapitre dimensionnement du bac supercapacitif pour les effets d'une augmentation du poids du véhicule.

5.6.2 Recherche de la taille du stockeur en fonction de la taille du moteur diesel

La méthode de dimensionnement du nombre de supercondensateurs nécessaire à intégrer pour obtenir les mêmes performances dynamiques pour le véhicule à stockage d'énergie et pour le véhicule de référence est présentée dans cette section.

Suite aux différentes méthodes de lissage accélération - freinage et montée - descente, il est possible de déterminer le plus petit moteur diesel à implémenter dans le véhicule dans le but d'avoir les mêmes caractéristiques dynamiques que celles du véhicule de référence. La puissance délivrée par le moteur diesel correspond à la puissance moyenne des moteurs de traction sur la totalité du parcours. La représentation de cette puissance est donnée dans la figure 5.18 et la puissance moyenne est de 42.46 kW. Ceci veut dire qu'un moteur délivrant cette puissance durant la totalité (pauses comprises) du parcours est suffisant pour obtenir les mêmes caractéristiques dynamiques que le véhicule de référence avec un moteur diesel de 760 kW.

Bien que l'utilisation d'un tel moteur soit théoriquement possible, les

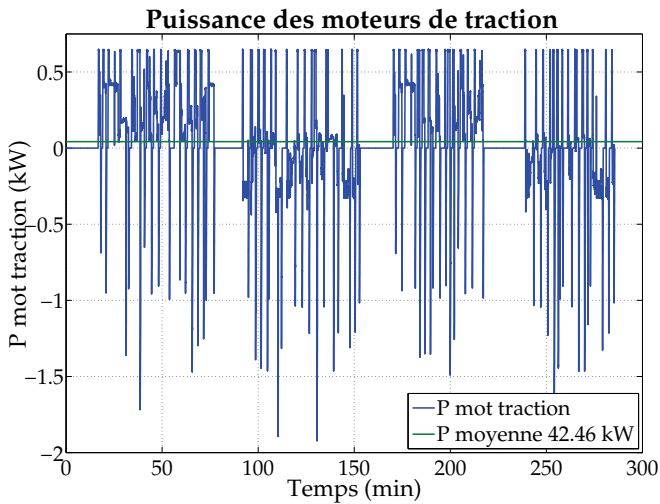


FIG. 5.18 – Puissance pour le parcours type

questions de poids et de volume du banc stockeur supercapacitif ne sont pas prises en compte. En effet, tout ajout de poids sans augmentation de la puissance transmise aux moteurs de traction se traduit par une diminution de l'accélération. Il est dès lors important que le poids du stockeur d'énergie soit faible vis-à-vis du poids du véhicule de référence. En plus, le coût d'achat des supercondensateurs doit également être pris en compte lors de ce calcul. En effet, la solution retenue dans ce chapitre doit être rentable du point de vue économique.

Dans la suite de ce chapitre, un compromis entre la taille du banc supercapacitif et la puissance maximale du moteur diesel doit être trouvé. En effet, en cas d'augmentation de la puissance du moteur diesel, la taille du banc stockeur d'énergie est réduite.

Le calcul de la dépendance entre le nombre de supercondensateurs et la puissance maximale délivrée par le moteur diesel est effectué par le calcul de la variation de l'énergie aux bornes du banc stockeur d'énergie. Plus cette variation d'énergie est importante, plus le nombre de supercondensateurs est élevé.

5.6.3 Résultats du dimensionnement

Le calcul de la recherche de la variation minimale de l'énergie aux bornes du banc de supercondensateurs est effectué en gardant la valeur de la puissance maximale du moteur diesel comme paramètre variable. Ainsi, il est possible d'effectuer le calcul du dimensionnement de la taille du stockeur d'énergie pour tout moteur compris dans la gamme 45 kW et 760 kW, soit dans la gamme de puissance entre le moteur diesel minimal et maximal.

La première partie du calcul consiste à rechercher les moments de fonctionnement du moteur diesel pour les phases d'alimentation directe des moteurs de traction. Dans le but de minimiser la variation de l'énergie aux bornes du banc de supercondensateurs, le moteur diesel suit au mieux les variations de la puissance consommée par les moteurs de traction. Ceci veut dire que si la puissance absorbée par les moteurs de traction est inférieure à la puissance maximale du moteur diesel, ce dernier va être utilisé directement pour alimenter les moteurs de traction. Dans le cas contraire, le moteur diesel va délivrer sa puissance maximale et le solde de la puissance de traction est prélevé dans le stockeur d'énergie.

La puissance ne pouvant être fournie directement par le moteur diesel est prélevée sur le banc de supercondensateurs ; il est donc nécessaire de déterminer de quelle manière et à quels moments ces dernières seront rechargées. Il existe deux solutions pour la recharge du banc stockeur : récupération lors des phases de freinage et fonctionnement du moteur diesel lorsqu'il n'est pas sollicité pour l'alimentation directe des moteurs de traction. Dans un premier temps, dans le but d'optimiser le rendement énergétique du véhicule, le choix est de récupérer l'énergie de freinage. Il est ainsi possible de distinguer deux cas : le cas de la récupération totale de l'énergie de freinage pour le parcours complet et le cas de la récupération partielle.

Dans le cas de la récupération complète de l'énergie de freinage, le calcul de l'énergie qui est encore déficitaire pour atteindre un bilan nul de la variation de l'énergie aux bornes du banc de supercondensateurs à la fin du parcours de référence doit être fait. Cette déficience d'énergie est prélevée sur le moteur diesel lors des moments où ce dernier ne fonctionne pas à sa puissance maximale.

Dans le cas de la récupération partielle de l'énergie de freinage, il s'agit de déterminer les moments de récupération de cette énergie sui-

vant une recherche de la moindre variation de l'énergie sur le banc de supercondensateurs. Dans ce cas, le moteur diesel n'est pas sollicité pour la recharge des supercondensateurs, du fait que le bilan d'énergie à la fin du parcours est déjà nul.

Il est dès lors possible de calculer la variation de l'énergie aux bornes du banc de supercondensateurs. Le résultat de la méthode de calcul pour un moteur diesel de 380 kW est présenté dans les figures 5.19 et 5.20. La figure 5.19 présente la puissance délivrée par le moteur diesel. Le point de fonctionnement au meilleur rendement pour le moteur de 380 kW est fixé à 310 kW. La figure 5.20 correspond à la puissance entrante (valeur négative) et sortante (valeur positive) du banc de supercondensateurs.

Les résultats pour tous les autres cas, c'est-à-dire pour d'autres puissances du moteur diesel sont résumés dans la figure 5.21 et le tableau 5.2 où la convention est prise de caractériser la taille du moteur diesel en définissant la puissance qu'il délivre à son point de fonctionnement à meilleur rendement.

Suite à la stratégie définie pour le calcul, la totalité de l'énergie de

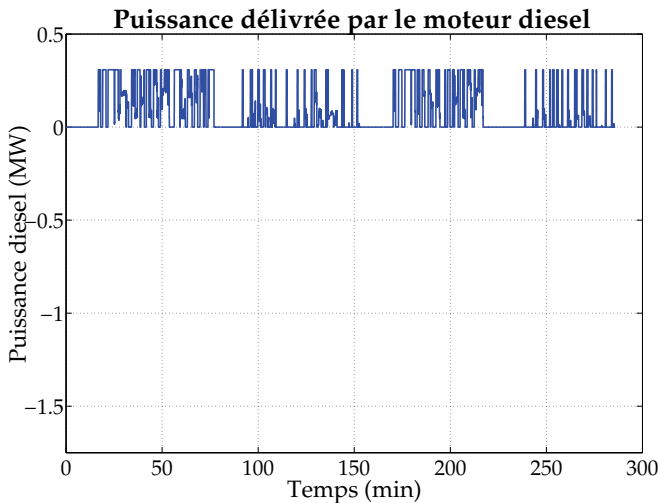


FIG. 5.19 – Puissance délivrée par le moteur diesel pour le cas de moteur diesel de 380 kW (dimensionnement optimal)

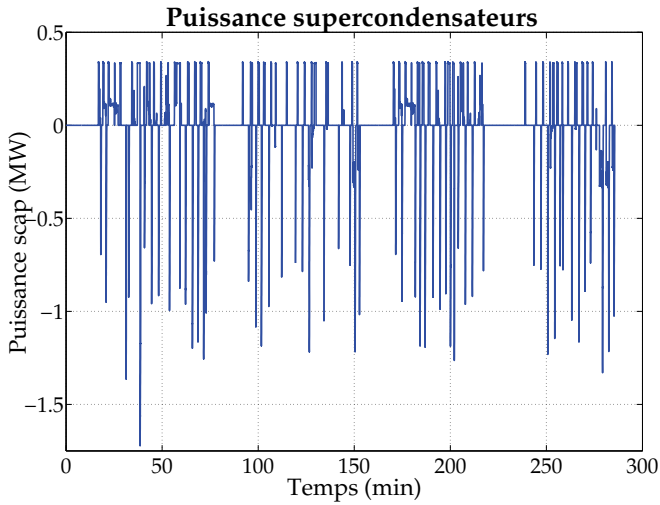


FIG. 5.20 – Puissance des supercondensateurs pour le cas de moteur diesel de 380 kW (dimensionnement optimal)

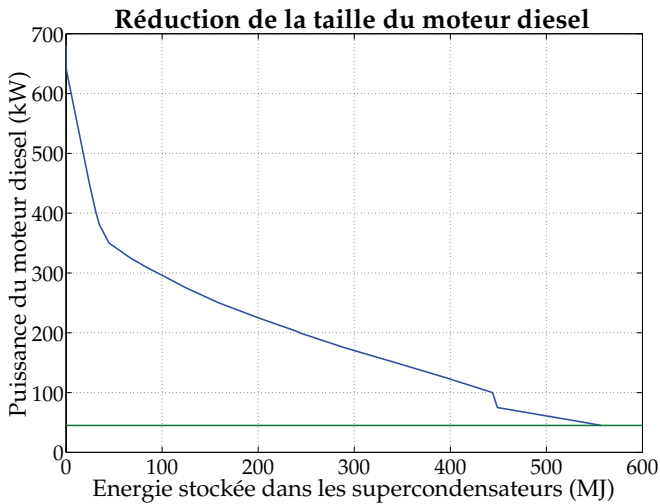


FIG. 5.21 – Taille du moteur diesel nécessaire en fonction de la taille du stockeur d'énergie

Puissance moteur diesel [kW]	Energie à stocker scap [MJ]	Nombre de scap	Volume [l]	Poids [t]
45	557	74955	35603	41.2
50	540	74031	35165	40.7
75	449	62245	29566	34.2
100	444	60290	28637	33.1
125	395	53718	25516	29.5
150	343	46494	22085	25.6
175	290	39694	18855	21.8
200	243	33110	15727	18.2
225	200	27179	12910	14.9
250	159	21488	10207	11.8
275	125	16859	8008	9.27
300	95.4	12971	6161	7.13
325	67.0	9124	4334	5.02
350	44.8	6094	2895	3.35
400	31.3	4255	2021	2.34
450	24.2	3312	1573	1.82
500	17.9	2412	1145	1.33
550	11.6	1791	851	0.984
600	5.31	725	345	0.398
640	0.279	38	18	0.021
680	0	0	0	0

TAB. 5.2 – Nombre de supercondensateurs nécessaire en fonction de la taille du moteur diesel

freinage n'est pas récupérée pour tout moteur diesel de plus de 125 kW.

La discontinuité dans les résultats présentés dans la figure 5.21 est due au principe de calcul qui a été utilisé. Cette discontinuité se produit pour des moteurs diesel d'environ 100 kW. Cette puissance correspond au passage entre les modes de récupération complète et partielle de l'énergie de freinage sur le parcours complet. Le choix a été fait dans le but de récupérer en premier lieu l'énergie de freinage et seulement ensuite de faire fonctionner le moteur diesel pour la recharge des super-

condensateurs (pour obtenir un bilan nul d'énergie à la fin du parcours). Ainsi, pour pallier le manque d'énergie lors des phases de montée (phase de forte consommation d'énergie), l'énergie est récupérée en premier lieu lors des phases de freinage, c'est-à-dire lors des phases de descente. Ceci implique que l'énergie ainsi récupérée est stockée durant une longue partie du parcours. Dans le second cas, où l'énergie de freinage n'est pas suffisante pour atteindre un bilan nul d'énergie sur le banc de supercondensateurs, le moteur diesel est utilisé pour compenser cette déficience d'énergie. Cette énergie pouvant être produite près des instants où elle est consommée, la variation d'énergie sur le banc stockeur n'est que de courte durée et n'influence pas la variation maximale d'énergie aux bornes du banc de supercondensateurs.

Les supercondensateurs retenus pour cette application sont de type BCAP3000 E270 T04 fabriqué par Maxwell Technologies, Suisse. Il s'agit du plus gros type de supercondensateur fabriqué par cette entreprise (valeurs 2007). La valeur de la capacité est de 3000 Farads et la tension maximale à leurs bornes est de 2.7 Volts.

Le calcul du nombre de supercondensateurs réalisé dans cette section est effectué en prenant en compte les rendements des phases charge - décharge du banc stockeur d'énergie.

Le nombre de supercondensateurs à implémenter dans le système de stockage du véhicule varie entre 0 (moteur 680 kW) et 75 000 (moteur de 45 kW). Il ne varie pas linéairement par rapport à la croissance de la puissance maximale du moteur diesel, mais suit une courbe exponentielle décroissante (figure 5.21). Il est dès lors intéressant de remarquer que le fait d'utiliser un nombre limité de supercondensateurs est suffisant pour pouvoir diminuer la taille du moteur diesel par un grand facteur.

Pour un moteur diesel de 350 kW, moteur qui correspond environ à la moitié du moteur utilisé dans le véhicule de référence, il est nécessaire d'utiliser 6094 supercondensateurs pour atteindre les mêmes performances dynamiques que le véhicule de référence. Le gain sur la consommation de carburant n'est pas négligeable et est déterminé dans les sections suivantes.

Le poids des supercondensateurs à embarquer à bord du véhicule varie entre 0 (moteur 680 kW) et 41.2 tonnes (moteur 45 kW). Il est dès lors évident que le choix d'un moteur de trop faible puissance a comme conséquence un alourdissement excessif du véhicule de référence dont le poids est d'environ 70 tonnes. En cas de choix d'un petit moteur, il

convient donc d'effectuer une correction sur la consommation finale du véhicule en prenant en compte l'ajout de poids. En effet, dans le critère de dimensionnement utilisé dans ce chapitre, l'hypothèse est faite de ne pas prendre en compte le poids du stockeur supercapacitif (négligé par rapport à la masse du véhicule).

A ce stade du dimensionnement, il n'est pas encore possible d'effectuer le choix final pour déterminer la taille optimale du stockeur d'énergie à utiliser dans le véhicule. Ce choix n'est réalisé qu'à la fin de ce chapitre en effectuant une comparaison entre la réduction de la consommation de diesel, le poids du banc de supercondensateurs, le volume du stockeur d'énergie et les considérations économiques.

Pour le choix du moteur diesel, un moteur de faible puissance n'est pas retenu et est dû principalement au prix d'achat trop élevé des supercondensateurs (par rapport au gain sur la consommation de carburant diesel). De même, un moteur de trop grande puissance n'est également pas retenu pour cause d'un manque d'intérêt sur la diminution de la consommation de carburant. Les trois solutions suivantes sont étudiées en détail dans la suite de ce chapitre :

- Moteur diesel de 300 kW
- Moteur diesel de 380 kW
- Moteur diesel de 470 kW

Le tableau 5.3 résume ces différentes solutions. Le véhicule de référence est propulsé par deux moteurs diesel de 380 kW chacun. Le volume d'un de ces moteurs peut être utilisé pour placer le banc de supercondensateurs. Le volume ainsi libéré est de 2 m^3 . Le solde du banc stockeur d'énergie est placé par l'allongement du module moteur

Puissance moteur diesel [kW]	Nombre de scap	Volume [m^3]	Poids [t]	Allongement du module de traction [cm]
300	22812	10.8	12.5	177
380	11537	5.48	6.35	70
470	4693	2.23	2.58	5

TAB. 5.3 – Résumé des cas étudiés pour le calcul du nombre optimal de supercondensateurs nécessaire

du véhicule dont la section disponible pour placer le stockeur est de 5 m^2 .

5.7 Simulations sur le parcours type

Une méthode de dimensionnement du stockeur d'énergie a été présentée dans la section précédente. Trois moteurs diesel de puissance différentes ont été retenus pour effectuer les simulations. Cette section présente les résultats des simulations concernant le système complet du véhicule avec stockeur supercapacitif embarqué.

5.7.1 Descriptif du simulateur

La première partie du simulateur consiste à modéliser le moteur diesel et la génératrice asynchrone. Les modèles de ces deux composants sont couplés mécaniquement par un arbre rigide.

La seconde partie du simulateur consiste à développer le système complet de régulation des transferts énergétiques à bord du véhicule. Les moments de fonctionnement du moteur diesel doivent être déterminés. En effet, il fonctionne soit à puissance constante, soit est arrêté (cf. figure 5.14). La régulation nécessaire pour la gestion de la charge - décharge des supercondensateurs est également implémentée. La courbe de charge sur les moteurs de traction est celle qui a été fournie par le constructeur.

Dans le but de vérifier le bon fonctionnement du simulateur, une première série de simulations est effectuée pour valider le cas d'un véhicule sans stockeur d'énergie. Cette solution sert de référence pour la comparaison avec le véhicule embarquant un système d'assistance en puissance.

La seconde partie des simulations consiste à valider le concept d'assistance en puissance pour le véhicule diesel-électrique. Ces simulations sont nécessaires pour vérifier le dimensionnement du stockeur d'énergie embarqué dans le véhicule et sont effectuées pour plusieurs tailles différentes de moteurs diesel. Les gains sur le rendement énergétique du véhicule peuvent ainsi être déterminés.

Le choix retenu est d'effectuer toutes les simulations à l'aide du logiciel Simplorer (Ansoft). Ainsi, tous les systèmes (moteur diesel, généra-

trice, convertisseurs, banc de supercondensateurs, etc) sont facilement modélisables.

Ce chapitre présente seulement les résultats détaillés des simulations pour le cas du moteur diesel de 380 kW. Les autres cas sont seulement résumés.

5.7.2 Résultats obtenus pour le cas du moteur diesel de 380 kW

La simulation du véhicule à stockage supercapacitif avec un moteur diesel de 380 kW représente la variante la plus facilement implémentable dans le véhicule de référence tel qu'il est actuellement fabriqué. En effet, l'utilisation d'un moteur diesel de 380 kW correspond au remplacement d'un groupe complet moteur diesel - génératrice par un banc stockeur de type supercapacitif. Le deuxième groupe est alors conservé sans modifications par rapport au véhicule de référence.

Le nombre de supercondensateurs à embarquer dans le véhicule est de 11 537 éléments de 3000 Farads. Le schéma de réglage du système complet d'assistance en puissance est donné dans la section 5.5.2. Dans ce schéma de réglage, le moteur diesel est commandé de manière à le faire fonctionner en permanence à son point de fonctionnement à meilleur rendement. Ainsi, le moteur diesel délivrera une puissance constante de 308 kW (correspondant au point de fonctionnement à meilleur rendement d'un moteur de 380 kW) lorsqu'il est en fonctionnement et 0 kW lors des phases d'arrêt. Le bilan écologique et énergétique du moteur diesel est ainsi optimum.

Suite à ce réglage du moteur diesel, les contraintes sur les moteurs de traction sont répercutées directement sur le banc supercapacitif. En comparaison avec le cas du véhicule de référence, le moteur diesel fonctionne de façon totalement autonome par rapport aux moteurs de traction. Cette solution ne peut être retenue que dans le cas où un système de stockage supercapacitif de puissance suffisante est utilisé dans le véhicule, ce qui est le cas ici.

Les résultats de cette simulation sont donnés dans les figures 5.22, 5.23 et 5.24.

Lors de la phase de montée (véhicule en circulation directe ; première montée) le moteur diesel est enclenché 6 fois. Lors de la deuxième phase de montée (véhicule en circulation régionale et dénivellation plus faible),

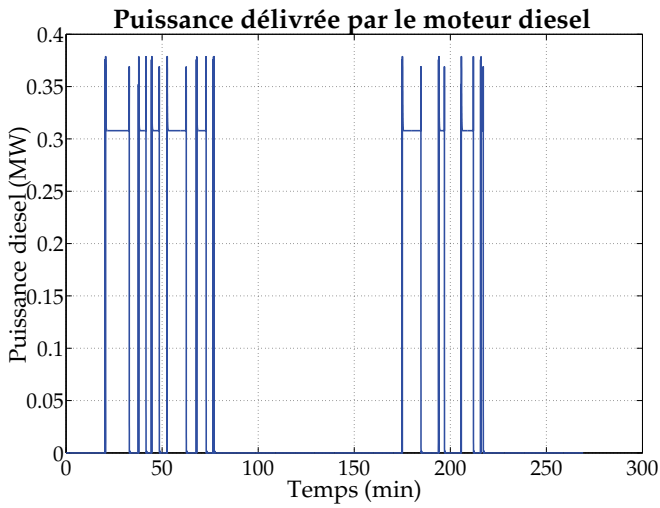


FIG. 5.22 – Puissance délivrée par le moteur diesel pour le cas du moteur diesel de 380 kW

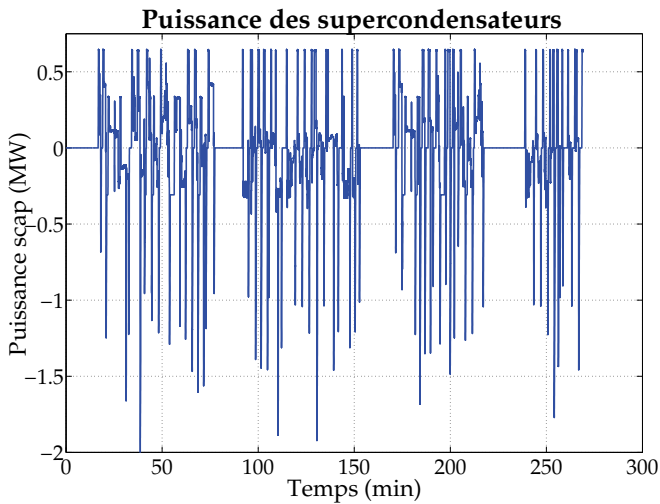


FIG. 5.23 – Puissance du banc supercapacitif pour le cas de moteur diesel de 380 kW

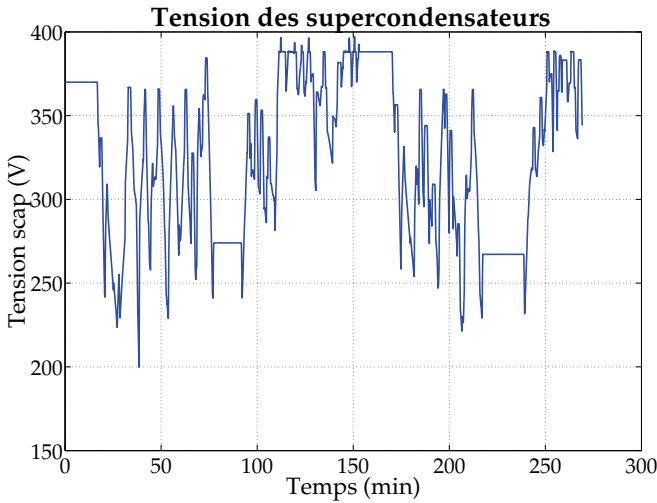


FIG. 5.24 – Tension aux bornes du banc de supercondensateurs

le moteur diesel est mis en route 4 fois. La durée de fonctionnement du moteur est comprise entre 3 et 10 minutes.

Durant tout le parcours, le rendement du moteur diesel est optimal du fait qu'il fonctionne en permanence au régime où son rendement est le meilleur. La température interne du moteur diesel, dont est directement dépendant le rendement énergétique du moteur, est constante et en permanence dans sa plage de meilleur fonctionnement. En effet, la baisse de température durant les phases d'arrêt est suffisamment faible à cause de l'importante inertie thermique d'un moteur diesel de cette taille. Lors du fonctionnement à puissance optimale, la température est régulée par le système de refroidissement. Dans la figure 5.22, les surpuissances qui sont représentées lors des démarrages et arrêts du moteur diesel sont dues aux modèles retenus dans le simulateur. Lors du calcul de l'énergie totale consommée par le véhicule, ce phénomène n'a aucune influence.

Le niveau de la tension aux bornes du banc de supercondensateurs représente l'état de charge de ce dernier. La plage de tension admissible pour le stockeur d'énergie est comprise entre 200 et 400 Volts. Cette

tension est représentée dans la figure 5.24. Le niveau de charge du banc de supercondensateurs lors de l'arrêt après la montée est faible pour permettre de récupérer un maximum de l'énergie de freinage lors de la descente qui suit. Ainsi, le niveau de charge est élevé lors de l'arrêt après la descente.

Le courant dans les résistances de freinage n'est pas nul durant tout le parcours. Ce courant montre que toute l'énergie de freinage n'est pas récupérée. L'établissement de ce courant est nécessaire pour que la tension aux bornes du banc de supercondensateurs reste contenue dans sa plage de fonctionnement. Ce résultat est conforme au dimensionnement effectué au début de ce chapitre et dont le but n'est pas de récupérer la totalité de l'énergie de freinage mais d'implémenter le plus petit banc stockeur d'énergie pour assurer le bon fonctionnement du véhicule.

L'énergie totale délivrée par le moteur diesel durant la totalité du parcours est de 286 kWh. L'énergie dissipée sous forme de chaleur dans les résistances de freinage est de 33 kWh. Ainsi, 11.5% de l'énergie mécanique délivrée par le moteur diesel est dissipée sous forme thermique dans les résistances de freinage.

Il est également important de remarquer que l'énergie délivrée par le moteur diesel passe de 590 kWh (véhicule de référence) à 286 kWh, ce qui représente une diminution de l'énergie consommée par un facteur d'environ 2. Ceci se traduit par une consommation de carburant diesel diminuée d'un facteur correspondant et cette réduction de consommation a une influence non négligeable sur la quantité de gaz polluants libérés dans l'atmosphère lors du cycle de fonctionnement du véhicule avec le système d'assistance en puissance proposé.

Dans le véhicule avec un système d'assistance en puissance, la variation des contraintes sur les moteurs de traction n'a pas d'influence directe sur le fonctionnement du moteur diesel. En effet, toute variation de puissance est compensée par le banc de supercondensateurs. Ainsi, lorsque le moteur diesel fonctionne, il délivre une puissance constante qui correspond à son fonctionnement à meilleur rendement.

5.7.3 Résumé des résultats obtenus pour les autres cas de moteurs diesel

Le résumé des différentes solutions en fonction de la taille du moteur diesel est présenté dans le tableau 5.4. Pour chaque cas étudié, est

Puissance moteur diesel [kW]	Energie mécanique moteur diesel [kWh]	Energie chopper de freinage [kWh]	Pourcentage par rapport GTW actuel [%]
780	590	375	100
470	381	152	64.5
380	286	33	48.5
300	250	31	42.3

TAB. 5.4 – Résumé des simulations pour les différents cas de moteurs diesel

donnée la puissance mécanique délivrée par le moteur diesel ainsi que l'énergie dissipée dans les résistances de freinage. La dernière colonne indique le pourcentage de l'énergie consommée par rapport au cas du véhicule de référence.

Dans tous les cas de moteurs diesel qui ont été retenus, la réduction de l'énergie fournie par le moteur diesel est comprise entre 35 et 58%. Ceci ne représente que le gain sur l'énergie produite. De plus, il faut prendre en considération que pour le système proposé le moteur diesel fonctionne en permanence dans sa plage de fonctionnement à meilleur rendement (alors que dans le cas du véhicule de référence, le moteur diesel fonctionne en permanence hors de sa plage de meilleur rendement). En effet, dans le cas du véhicule de référence, le moteur diesel doit répondre à toutes les contraintes en puissance des moteurs de traction alors que pour un véhicule avec un système d'assistance en puissance, toutes les variations de puissance sur les moteurs de traction sont récupérées sur le stockeur d'énergie et non plus sur le moteur diesel.

Le choix optimal de la taille du moteur diesel et de son stockeur d'énergie associé ne peut pas encore être effectué à ce stade de l'étude. En effet, en plus du critère sur le rendement énergétique, le critère du coût du système doit encore être étudié et est présenté dans la section suivante.

5.8 Considérations économiques

A partir des résultats des simulations présentés dans la section 5.7 pour différentes tailles de moteurs diesel, il est possible de déterminer le coût économique lié à l'ajout d'un banc de supercondensateurs à bord du véhicule de référence. Ce coût doit être mis en relation avec la baisse de la consommation de carburant diesel ainsi qu'avec les modifications qui sont apportées par rapport au véhicule de référence. Une étude économique détaillée sur le prix de revient lors de l'exploitation d'une automotrice articulée à stockage supercapacitif par rapport à la solution standard sans récupération de l'énergie de freinage est présentée dans cette section.

L'étude des coûts est divisée en deux parties :

- Coûts de fabrication du véhicule
- Coûts d'exploitation du véhicule

5.8.1 Considérations économiques pour la fabrication du véhicule

La première partie pour déterminer les coûts liés à l'exploitation d'un véhicule à stockage d'énergie à base de supercondensateurs consiste à évaluer le prix de fabrication du véhicule. En fait, seulement la différence de prix entre le véhicule de référence et le véhicule avec un système d'assistance en puissance est déterminée.

Afin de calculer la différence de prix de fabrication entre les deux solutions, les composants qui diffèrent entre les deux cas sont présentés dans le tableau 5.5.

La principale différence consiste à supprimer un groupe moteur diesel - génératrice - convertisseur (AC/DC) et de le remplacer par un banc de supercondensateurs accompagné de son convertisseur (DC/DC). En ce qui concerne la différence concernant la construction mécanique de la caisse du véhicule, seul un allongement est nécessaire (cf. section 5.6.3).

Les résistances de freinage (accompagnées du convertisseur pour leur pilotage) ne sont pas modifiées entre les deux cas. En effet, lorsque le banc de supercondensateurs est complètement chargé, le véhicule doit avoir les mêmes caractéristiques de freinage que le véhicule de référence. Ainsi, la puissance thermique instantanée qui doit pouvoir être dissipée est identique dans les deux cas.

	Véhicule de référence	Véhicule à stockage supercapacitif
Groupe moteur diesel-génératrice	2 groupes	1 groupe
Convertisseur AC/DC	2 convertisseurs	1 convertisseur
Capacité de lissage du bus continu	1 capacité	1 capacité
Convertisseur DC/AC	2 convertisseurs	2 convertisseurs
Moteurs de traction	2 moteurs asynchrones	2 moteurs asynchrones
Convertisseur DC/DC pour le stockeur	-	1 convertisseur
Banc stockeur scap	-	1 banc
Résistances de freinage (inclus le contrôle)	1 dispositif complet	1 dispositif complet
Réalisation mécanique de la caisse du véhicule	Longueur initiale	Rallongement de la caisse

TAB. 5.5 – Différences des composants entre le véhicule de référence et le véhicule avec un stockeur d'énergie supercapacitif

Les convertisseurs statiques associés aux moteurs de traction et les moteurs de traction sont identiques dans les deux cas. En effet, les performances dynamiques du véhicule (représentées par les puissances d'accélération et de freinage) sont inchangées.

Pour le cas du véhicule de référence, les différences de coûts sont les suivantes :

- Un groupe moteur diesel - génératrice enlevé : - CHF 60 000.-
- Un convertisseur AC - DC enlevé : - CHF 50 000.-
- Un convertisseur DC - DC ajouté : + CHF 50 000.-
- Modification de la partie mécanique : + CHF 60 000.-
- Banc stockeur supercapacitif : Dépend de la taille du moteur retenu

La différence de prix entre les deux solutions se résume donc au prix d'achat du banc stockeur d'énergie. Pour ce calcul, les hypothèses suivantes sont faites : le prix du groupe moteur diesel - génératrice est égal pour toutes les tailles de moteur diesel retenues dans ce chapitre. Cette approximation peut être faite car tous les moteurs retenus délivrent une puissance du même ordre de grandeur. Le prix concernant la modification mécanique de la caisse du véhicule est également compté comme étant identique pour tous les cas retenus.

En ce qui concerne le remplacement d'un convertisseur AC - DC par un convertisseur DC - DC, le bilan économique est supposé nul. En effet, le prix d'un convertisseur DC - DC est du même ordre de grandeur qu'un convertisseur AC - DC pour une puissance identique.

Le prix d'achat des supercondensateurs, modèle BCAP3000 E270 T04 de Maxwell Technologies est de CHF 129.- pièce (prix novembre 2007). Bien que le prix d'achat des supercondensateurs va baisser dans les prochaines années, tous les calculs vont être effectués en prenant comme base ce prix d'achat. Dans le cas d'une baisse du prix d'achat de ces composants dans le futur, le véhicule diesel-électrique avec un système d'assistance en puissance sera encore plus économique que le calcul présenté dans cette section. Le résumé des différences de prix de construction entre le véhicule avec un stockage d'énergie supercapacitif et le véhicule de référence est donné dans le tableau 5.6.

Moteur	Nb scap	Prix scap	Différence de prix totale
760 kW	0	0	0
470 kW	4 693	605 000	+ 605 000
380 kW	11 537	1 488 000	+ 1 488 000
300 kW	22 812	2 943 000	+ 2 943 000

TAB. 5.6 – Variations des coûts de fabrication entre le véhicule de référence et le véhicule à stockage supercapacitif

5.8.2 Considérations économiques pour l'exploitation du véhicule

Lors de l'exploitation d'un véhicule de type diesel-électrique, les frais d'exploitation se répartissent en deux catégories distinctes :

- Entretien du matériel roulant
- Achat du carburant diesel

Pour les frais d'entretien du matériel roulant, l'hypothèse est faite qu'ils sont identiques pour un véhicule de type diesel-électrique standard et pour le véhicule avec un stockeur d'énergie. Cette hypothèse peut être faite car le système de stockage supercapacitif ne nécessite aucun entretien supplémentaire comparativement à un moteur diesel. Toutefois, une faible diminution du coût d'entretien pour le système à base de stockage d'énergie peut être observée en raison de la suppression de l'un des deux moteurs diesel. Dans la suite des calculs, cette différence est considérée comme nulle.

La seconde partie des frais d'exploitation concerne l'achat du carburant diesel. Suite aux simulations qui ont été présentées, il est possible de déterminer la quantité de carburant qui est nécessaire pour le parcours de référence pour les différents cas retenus.

Le calcul de la consommation de carburant est effectué directement après analyse de l'énergie délivrée par le moteur diesel (cf. section 5.7). La consommation spécifique b_e (g/kWh) d'un moteur diesel est prise ici comme étant 198 g/kWh et correspond à la consommation d'un moteur type Liebherr diesel de 220 kW dans sa plage de fonctionnement à meilleur rendement. Ce calcul est exact pour le cas d'un véhicule diesel à stockage d'énergie car le moteur thermique est exploité en permanence soit dans sa plage de fonctionnement à meilleur rendement, soit est arrêté.

Pour la consommation du véhicule de référence, le moteur diesel n'est pas exploité en permanence dans sa plage de fonctionnement à meilleur rendement. Toutefois, pour simplifier les calculs, l'hypothèse est faite de considérer la même consommation spécifique que dans le cas du fonctionnement optimal. Dans un cas réel, cette consommation est plus élevée que celle qui va être calculée dans cette section. Cette consommation va donc être sous-évaluée et cette hypothèse de calcul est justifiée dans la suite de ce chapitre.

Dans les simulations qui ont été présentées, la masse du véhicule a été considérée comme identique pour tous les cas étudiés. En réalité, elle n'est pas identique dans tous les cas et dépend directement de la taille de stockeur d'énergie embarqué. Cette augmentation de poids implique une augmentation de la consommation totale du véhicule. L'ajout du poids des supercondensateurs n'a pas été pris en compte dans les simulations, une correction sur la consommation finale du véhicule avec un stockeur supercapacitif doit être réalisée. Les résultats correspondant avec la consommation corrigée sont donnés dans le tableau 5.7.

Moteur	Consom- mation corrigée pour 1 parcours	Consom- mation pour 1 parcours	Consom- mation par an	Coûts d'ex- ploitation par an
760 kW	590 kWh	142.7 l	156 300 l	296 970 CHF
470 kW	396 kWh	95.65 l	104 735 l	199 000 CHF
380 kW	313 kWh	75.64 l	82 826 l	157 000 CHF
300 kW	297 kWh	71.74 l	78 551 l	149 250 CHF

TAB. 5.7 – Variations des coûts d'exploitation entre le véhicule de référence et le véhicule avec un stockeur supercapacitif

La consommation de carburant diesel correspondante est calculée pour un parcours et est donnée dans le tableau 5.7. Dans le but de calculer les coûts totaux pour une année d'exploitation, le nombre de parcours que le véhicule effectue chaque jour doit être déterminé. L'hypothèse est faite que le parcours de référence est parcouru 3 fois par journée d'exploitation. La durée du parcours de référence étant d'environ 4 heures, le temps d'utilisation du véhicule est de 12 heures par jour. La consommation du véhicule peut alors être calculée pour une année (365 jours d'exploitation). La consommation annuelle pour les différents moteurs diesel retenus est donnée dans le tableau 5.7

Le prix d'achat du carburant diesel considéré dans ce chapitre est de CHF 190.- pour 100 litres de diesel (valeur novembre 2007). L'hypothèse est faite de garder ce prix constant durant la totalité de la durée d'exploitation du véhicule. Toutefois, la tendance du cours du

prix d'achat du carburant diesel est à la hausse. Le prix qui est calculé pour l'achat du carburant diesel est donc sous-estimé et ce choix de sous-dimensionnement est justifié dans la suite de ce chapitre. Les résultats concernant le prix d'achat du carburant diesel pour une année sont donnés dans le tableau 5.7.

5.8.3 Considérations économiques globales

La différence pour les coûts de fabrication et d'exploitation entre le véhicule de référence et le véhicule à stockage d'énergie a été présentée dans les deux sections précédentes. Le rapport entre l'augmentation du prix de fabrication et la diminution des coûts d'exploitation permet de déterminer le seuil de rentabilité du véhicule avec un stockeur d'énergie. Dans le calcul qui est présenté dans cette section, seule la différence des coûts entre les différentes solutions va être déterminée.

Lors du calcul du coût d'investissement, aucun intérêt sur la somme investie n'est pris en compte dans cette section. Ceci peut être admis car ces frais sont faibles par rapport aux coûts totaux d'exploitation (achat du carburant). Les coûts d'exploitation et de l'investissement supplémentaire sont représentés dans la figure 5.25.

Le prix initial (an 0) représente les coûts de l'investissement supplémentaire du véhicule avec un stockeur d'énergie de type supercapacitif par rapport au véhicule de référence. Le coût pour chaque année correspond à l'investissement initial additionné aux coûts d'exploitation représentés par l'achat du carburant diesel.

Le cas du moteur de 470 kW est rentable du point de vue économique par rapport au véhicule de référence pour une exploitation sur 25 ans. Le gain sur les coûts d'exploitation et l'achat des supercondensateurs sur 25 ans d'exploitation est de 24.8 % et le seuil de rentabilité est atteint après 6 années d'exploitation.

Le cas du moteur de 380 kW est rentable après une période d'exploitation de 11 ans. Cette solution est également rentable par rapport au moteur de 470 kW après 21 années d'exploitation, tout en ayant un impact sur l'environnement moins important dû à une consommation de carburant plus faible.

La solution utilisant un moteur de 300 kW est rentable après 20 années d'exploitation. Bien que cette solution soit celle qui présente le plus grand gain sur la baisse de consommation de carburant, cette

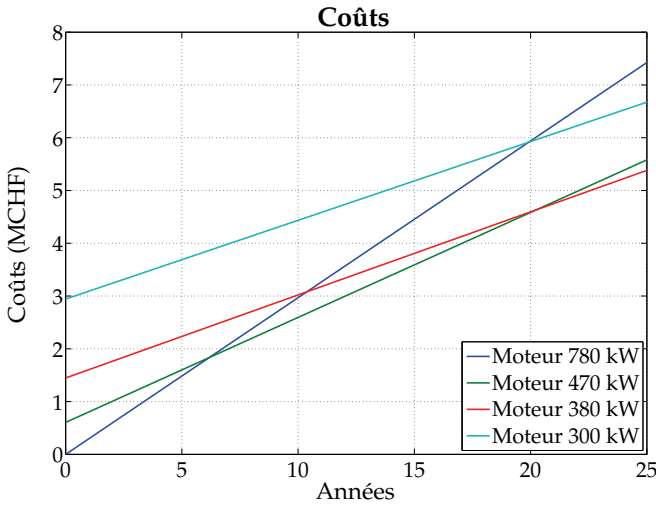


FIG. 5.25 – Coûts d'exploitation et investissement supplémentaire

solution n'est pas rentable face aux deux autres cas présentés.

Dans les calculs présentés dans ce chapitre, la consommation du véhicule de référence a été sous-estimée. L'hypothèse a été faite que le moteur diesel est exploité en permanence dans sa plage de fonctionnement à meilleur rendement. En fait, la réalité est tout autre et le moteur diesel ne fonctionne que très rarement dans cette plage. Ainsi, la courbe représentée en bleu devrait avoir une pente plus importante. Le gain des systèmes à stockage supercapacitif est encore plus avantageux face au véhicule de référence.

De plus, le prix du carburant diesel a été considéré comme constant durant les 25 années d'exploitation. Ce prix n'est en fait pas fixe, mais suit une tendance à la hausse. Toutes les courbes représentées dans la figure 5.25 devraient donc avoir une pente plus forte. L'augmentation de ces pentes serait à mettre en relation avec les consommations des différentes solutions. Ainsi, le véhicule à stockage d'énergie proposerait une solution encore moins chère par rapport au véhicule de référence.

La solution la plus favorable du point de vue économique est donc

l'utilisation de la variante avec un moteur diesel de 380 kW. Avec ce moteur, le gain sur les coûts d'exploitation et investissement est de 27.5 % pour une durée d'exploitation de 25 ans. Le gain sur la consommation est de 47 %, ce qui se traduit directement par une diminution des gaz polluants rejetés dans l'atmosphère.

5.9 Conclusion

L'objectif de ce chapitre concerne l'étude d'un système d'assistance en puissance pour un véhicule diesel-électrique par l'ajout d'un stockeur d'énergie embarqué de type supercapacitif.

Le principal but de la solution étudiée consiste à améliorer le rendement énergétique d'un véhicule de type diesel-électrique et de limiter les rejets polluants de ce véhicule. L'exemple d'application présenté dans ce chapitre concerne un parcours de référence situé sur la ligne Merano - Malles situé au nord de l'Italie. Le type de véhicule utilisé sur cette ligne correspond à une automotrice diesel-électrique utilisant deux moteurs diesel de 380 kW. Les concepts et les méthodes de calcul présentés dans ce chapitre peuvent être appliqués à tout autre type de parcours et de véhicule diesel-électrique.

L'ajout d'un banc supercapacitif à bord du véhicule permet de limiter les contraintes en puissance sur le moteur diesel. Dès lors, il est possible d'utiliser un moteur diesel de plus faible taille tout en conservant les mêmes performances dynamiques. La stratégie concernant la gestion des flux d'énergie à bord du véhicule est totalement modifiée et est présentée dans ce chapitre. Le second avantage lié à l'utilisation d'un banc stockeur d'énergie dans le véhicule est la possibilité d'imposer le point de fonctionnement du moteur diesel pour l'exploiter en permanence dans sa plage de meilleur rendement énergétique.

La première partie de ce chapitre présente une méthode de dimensionnement du banc stockeur d'énergie. Le calcul est réalisé pour plusieurs tailles différentes de moteurs diesel dans le but de limiter la taille du stockeur d'énergie nécessaire.

La seconde partie consiste à vérifier la méthode de calcul du nombre de supercondensateurs nécessaire par des simulations du véhicule complet à stockage d'énergie. Ces simulations permettent également de déterminer le gain sur le rendement énergétique du véhicule lors de l'ajout

d'un système d'assistance en puissance. Elles sont réalisées pour des moteurs diesel de puissance 300, 380 et 480 kW.

La dernière partie de ce chapitre concerne le calcul du point de vue économique du système d'assistance en puissance. La différence de prix entre le véhicule de référence et celui à récupération d'énergie est déterminée en prenant en compte une durée de vie de 25 années.

Le meilleur compromis trouvé lors de cette étude consiste à remplacer un des deux moteurs diesel de 380 kW intégré dans l'automotrice articulée GTW standard par un banc stockeur composé d'environ 11 500 supercondensateurs de 3 000 F. La réduction de la consommation de carburant est de 47 % et le gain écologique est du même ordre de grandeur. Le système est économiquement rentable après une durée d'exploitation de 11 ans par rapport à l'utilisation d'un véhicule diesel-électrique de type standard.

Chapitre 6

Un véhicule électrique léger

6.1 Introduction

Les deux chapitres précédents ont présenté une étude concernant l'effet sur la consommation énergétique lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance pour deux types de véhicules différents : le premier était un véhicule alimenté par caténaire et le second un véhicule diesel-électrique. Les exemples d'application qui ont été présentés étaient des véhicules de type tram pour le premier et de type automotrice articulée pour le second.

Ce chapitre présente un troisième cas d'étude caractérisé par un véhicule léger alimenté à partir de batteries. Les méthodes de calcul ont été développées pour un véhicule de type scooter électrique, mais les mêmes démarches peuvent être appliquées à tout autre véhicule dont la source d'énergie primaire est une batterie.

Un parcours de référence est retenu pour l'étude de ce type de véhicule, mais les mêmes méthodes peuvent être adaptées à tout autre par-

cours. Il se situe en milieu urbain et est caractérisé par de nombreuses phases accélération-freinage dues au trafic, aux feux de circulation, etc. En se rapportant au chapitre 2, il a été montré que l'ajout d'un système d'assistance en puissance permet de diminuer la consommation énergétique de ce type de véhicules par un important facteur dans ces conditions d'exploitation.

Le principal avantage de la propulsion tout électrique où l'énergie à bord du véhicule est stockée dans des batteries est qu'il ne libère pas de gaz polluants lors de son utilisation. Toutefois, le procédé utilisé pour produire l'énergie électrique pour la recharge des batteries doit être pris en compte. Par exemple, dans le cas où cette énergie est produite à partir de dérivés du pétrole, des gaz polluants sont libérés dans l'atmosphère.

En plus de la problématique concernant l'approvisionnement électrique pour la charge des batteries, les principaux inconvénients avec ce type de véhicules utilisant des batteries sont les suivants :

1. La durée de vie des batteries est courte, surtout si les contraintes instantanées en puissance leur étant appliquées sont importantes
2. L'autonomie qu'il est possible d'atteindre avec des batteries de type conventionnel est limitée
3. Le courant maximal de charge des batteries est faible, la charge nécessite en général plusieurs heures et l'énergie de freinage ne peut que partiellement être récupérée

Ce chapitre présente l'étude d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué dont le but est de limiter les contraintes en puissance qui sont appliquées sur les batteries et donc de supprimer tous les inconvénients ci-dessus. De plus, la solution retenue permet de récupérer l'énergie de freinage de manière optimale. Ce chapitre présente une méthode de dimensionnement du stockeur d'énergie pour atteindre ce but. Le stockeur d'énergie qui a été retenu dans cette thèse est les supercondensateurs qui ont les propriétés en puissance requises pour ce type d'application. Le principe consistant à combiner des batteries et des supercondensateurs a été présenté dans [78] [79].

Le véhicule qui a été pris comme base dans ce chapitre est un scooter électrique présent sur le marché. Lors de l'étude approfondie de ce véhicule, il a été mis en avant que le système de récupération d'énergie n'est pas implémenté de manière complète. Ce chapitre ne présente pas les solutions concernant ce problème car elles ont été développées depuis

longtemps. Par contre, le stockeur d'énergie ajouté dans le véhicule doit remplir les conditions pour récupérer la totalité de cette énergie.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à des simulations du véhicule avec le système d'assistance pour valider les concepts introduits lors du dimensionnement du stockeur d'énergie et de la définition de la gestion de l'énergie à bord.

6.2 Définition du véhicule de référence

Cette section présente les caractéristiques du véhicule électrique léger pris comme référence dans ce chapitre, dans ce cas un scooter électrique. Les méthodes de dimensionnement introduites dans la suite de ce chapitre sont données pour ce véhicule, mais les mêmes méthodes et concepts peuvent être appliquées à tout autre véhicule dont la source d'énergie principale est une batterie.

L'étude présentée dans ce chapitre est basée sur un modèle existant de scooter électrique, le Scoot'Elec fabriqué par l'entreprise Peugeot, France. Une photo de ce scooter est donnée à la figure 6.1 et les principales caractéristiques figurent dans le tableau 6.1.

Le véhicule de référence pour cette étude comporte 3 batteries Nickel-Cadmium de 100 Ah et dont la tension est de 6 V. La re-



FIG. 6.1 – Photo du scooter Peugeot Scoot'Elec

6.2. Définition du véhicule de référence

Caractéristiques	Vitesse maximale	45 km/h
	Accélération départ arrêté	100 m en 12 s 10 m en 3.05 s
	Masse à vide	115 kg
	Masse maximale transportée	80 kg
Energie	Nombre de batteries	3
	Type des batteries	6 V / 100 Ah Nickel-Cadmium
	Type de couplage	Série
	Masse totale des batteries	38.4 kg
Chargeur	Temps de charge complet	5 heures
	Puissance	1400 W
Electronique	Type de régulation	Microcontrôleur
	Type de convertisseur	Hacheur à transistor
	Freinage	Récupération
Moteur	Type	CC à excitation séparée
	Puissance max (5 minutes)	3 kW
	Puissance nominale	1.3 kW
	Rendement minimum	68 %
Autonomie	Distance parcourue à vitesse maximale	45 km
	Distance parcourue en mode économique	60 km
	Distance parcourue en cycle urbain	40 km
Fiabilité	Durée de vie	60 000 km ou 10 000 h

TAB. 6.1 – Caractéristiques du Peugeot Scoot'Elec

charge des batteries est effectuée à l'aide d'un chargeur embarqué par un simple branchement sur le réseau d'alimentation domestique sur une prise 230 V / 16 A. Une recharge complète des batteries dure cinq

heures, mais 95 % de la capacité totale des batteries est atteinte après les deux premières heures de charge. Les 3 heures suivantes servent à terminer le charge à faible courant et à égaliser la charge dans les différentes batteries. En cas de besoin d'une recharge partielle et rapide, il est possible de récupérer 5.5 km d'autonomie en 10 minutes.

Les batteries sont placées sous la selle du scooter, la masse totale pour les 3 batteries est de 38.4 kg, ce qui représente 1/3 de la masse à vide du véhicule et le volume total est de 23.6 litres. Un modèle standard fabriqué par Saft, France, est utilisé dans le véhicule de référence : STM 5-100.

Une autonomie maximale de 60 km est indiquée par le constructeur. Lors d'essais réalisés en milieu urbain, l'autonomie mesurée est beaucoup plus faible. Dès 30 km parcourus avec le scooter, les caractéristiques dynamiques (accélération, couple moteur, etc) deviennent faibles.

A partir de ces mesures, il est dès lors possible de mettre en avant que le facteur limitant lors de l'utilisation d'un véhicule de type électrique est le système de stockage de l'énergie électrique embarqué dans le véhicule. En effet, pour augmenter l'autonomie, il est possible d'utiliser un plus grand nombre de batteries, mais l'augmentation de la masse du véhicule est trop importante et implique une réduction des performances dynamiques. D'autres solutions doivent être étudiées pour atteindre une autonomie plus importante tout en conservant la même masse à vide du véhicule. La suite de ce chapitre est consacrée à présenter une solution permettant d'augmenter cette autonomie par l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur additionnel d'énergie embarqué dans le véhicule.

La figure 6.2 représente le schéma bloc du véhicule de référence tel

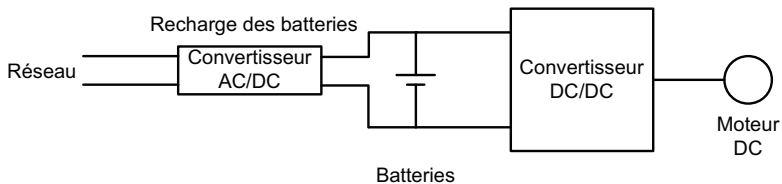


FIG. 6.2 – Schéma bloc du véhicule de référence

qu'il est actuellement construit par l'entreprise Peugeot. Une structure identique est utilisée dans la majorité des véhicules électriques légers actuellement sur le marché. Le véhicule est composé d'un moteur à courant continu à alimentation séparée alimenté par un convertisseur DC/DC connecté aux batteries. La charge de ces batteries est réalisée par une connexion au réseau d'alimentation domestique par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC.

La structure du véhicule permet théoriquement de récupérer l'énergie de freinage. Dans ce cas, le moteur fonctionne en mode génératrice et le convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant permet de réinjecter l'énergie de freinage dans les batteries. La seule limitation sur l'énergie de freinage qui peut être récupérée est fixée par le courant maximal de recharge des batteries. Pour le type de batteries utilisées dans le véhicule de référence, le courant de recharge maximal est de 100 A. Pour le bloc complet des batteries (3), la puissance maximale de freinage qu'il est théoriquement possible de récupérer est de :

$$18 \text{ V} \cdot 100 \text{ A} = 1800 \text{ W} \quad (6.1)$$

6.3 Mesures effectuées sur le parcours de référence

Dans le but de vérifier les données du constructeur concernant la récupération de l'énergie de freinage ainsi que pour mesurer les contraintes appliquées sur les batteries, une série de mesures a été réalisée directement sur le scooter électrique disponible au laboratoire du LEI. Le but de ces mesures est d'obtenir les différentes caractéristiques du véhicule lors d'une utilisation typique en milieu urbain. En effet, ce type de véhicule est principalement construit pour une utilisation en ville à cause de sa faible autonomie.

Pour effectuer ces mesures, le véhicule est équipé de capteurs et d'une carte à base de microcontrôleur NEC. La figure 6.3 représente une photo de l'intérieur du scooter équipé pour les mesures.

Les mesures sont effectuées pour différents parcours en ville de Lausanne, Suisse. Cette ville ayant un fort dénivelé, les contraintes énergétiques sur les batteries sont élevées. De plus, le nombre de phases accélération - freinage est important. Ceci est dû au nombreux obstacles,

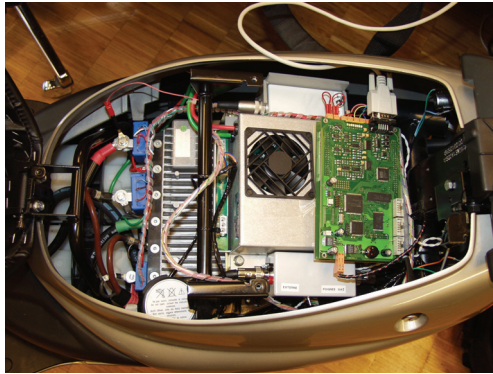


FIG. 6.3 – Photo de l'intérieur du scooter équipé pour les mesures

notamment les feux de signalisation, les transports publics, les stops, les piétons, etc. Ce type de parcours avec tous ces arrêts est typique de l'utilisation citadine d'un véhicule. Les différents parcours étudiés sont donnés dans le tableau 6.2.

No	Lieu départ	Lieu arrivée	Remarque
1	Vidy (375 m)	Gare (447 m)	Aller-retour
2	Ouchy (374 m)	Beaulieu (535 m)	Aller simple
3	Cathédrale (540 m)	Bellerive (375 m)	Aller simple
4	Beaulieu (535 m)	Cathédrale (540 m)	Aller simple
5	Vidy (375 m)	EPFL (396 m)	Aller simple

TAB. 6.2 – Parcours mesurés avec le Scoot'Elec

Dans cette liste, le parcours 1 est retenu comme parcours de référence pour la suite de ce chapitre. Il s'agit du parcours où les contraintes sur les batteries sont les plus élevées. De plus, il représente une application typique d'un véhicule léger en ville avec des montées, des descentes, un grand nombre de phases d'accélération - freinage. Dans tous les dimensionnements qui vont suivre dans ce chapitre, ce parcours servira de base aux différents calculs présentés.

Le parcours retenu est composé de quatre tronçons différents. Le

premier est un parcours en palier et limité à 30 km/h. Le second est aussi plat, mais limité à 50 km/h. Le troisième est une montée raide, limitée à 50 km/h. Le dernier est une pente douce, toujours avec une vitesse maximale de 50 km/h. Le trajet du retour s'effectue par la même route.

La figure 6.4 représente la mesure de la vitesse sur le parcours de référence. Il est possible de voir le nombre important de phases accélération - freinage lors de ce parcours. Comme il s'agit de mesures faites dans un environnement réel, dans ce cas la ville de Lausanne, les mesures effectuées correspondent à une image fidèle d'une utilisation quotidienne de ce type de véhicule.

Les figures 6.5 et 6.6 représentent les caractéristiques des batteries pour le parcours type. La figure 6.5 représente la tension aux bornes des batteries et la figure 6.6 représente le courant prélevé sur les batteries. La convention concernant le courant des batteries est qu'un courant positif correspond à un courant prélevé sur les batteries alors qu'un courant négatif correspond à un courant réinjecté dans ces dernières.

A début du parcours, la tension aux bornes des batteries est de

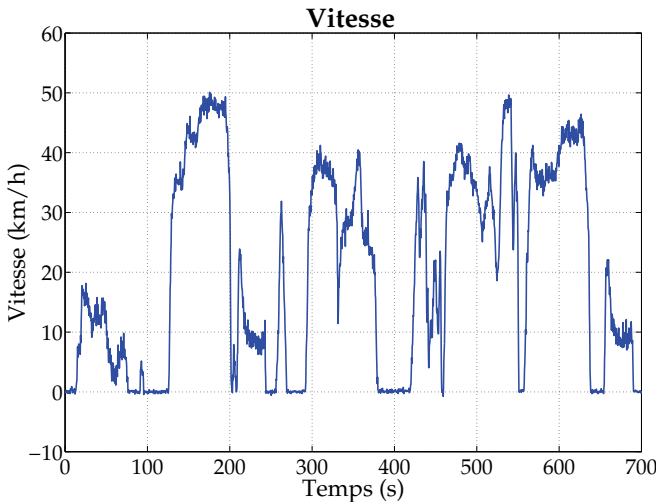


FIG. 6.4 – Vitesse sur le parcours de référence

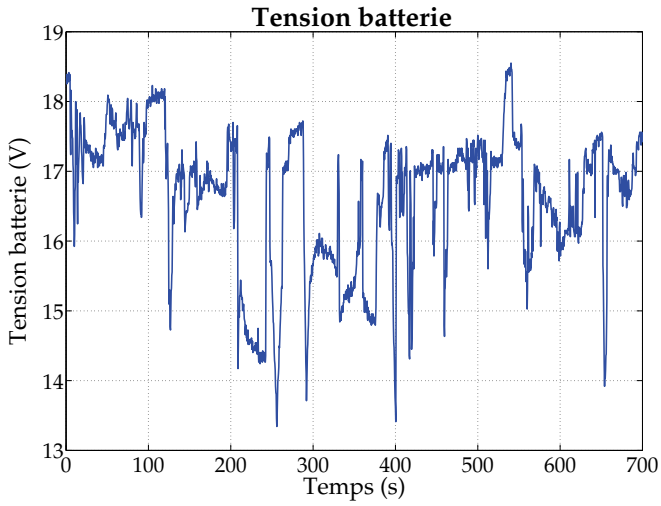


FIG. 6.5 – Tension aux bornes des batteries

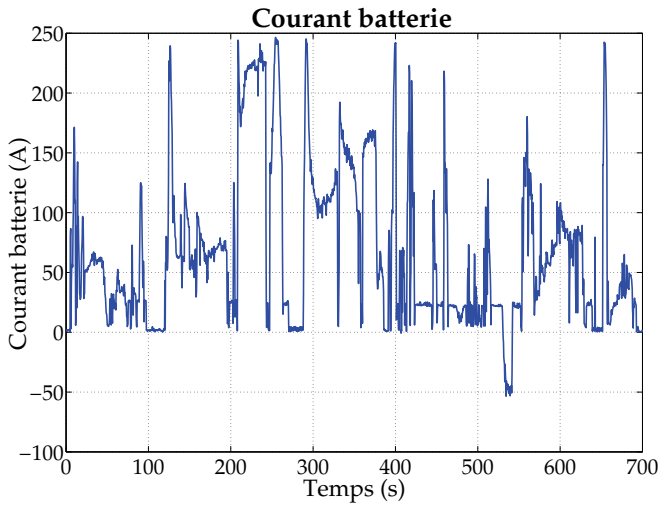


FIG. 6.6 – Courant des batteries

18.5 Volts. Lors des accélérations, la tension aux bornes des batteries chute jusqu'à 13.5 Volts. Cette chute de tension est due à la résistance interne des batteries lorsqu'un fort courant y est prélevé. En plus de la chute de tension, ce phénomène induit des pertes joules dans la batterie. Au temps 525 secondes, la tension aux bornes des batteries remonte à 18.5 Volts ; à ce moment, le véhicule est en train de réinjecter de l'énergie de freinage dans les batteries.

Le courant prélevé dans les batteries est de 250 Ampères lors des phases maximales d'accélération. Lors du freinage au temps 525 secondes, le courant maximal de recharge des batteries est de 52 Ampères.

Les pertes dues à la résistance interne des batteries sont évaluées à partir des figures 6.5 et 6.6. Au temps de 120 secondes, une chute de tension aux bornes des batteries de 2.4 V est observée lorsqu'un saut de courant de 240 A est prélevé. Ainsi, la résistance interne des batteries est de 10 m Ω et la puissance dissipée dans les batteries est de 576 W lorsque la puissance utile pour le véhicule est de 3.5 kW.

Les mesures des caractéristiques du moteur sont données dans les figures 6.7 et 6.8. La tension appliquée au moteur est comprise entre 0 et 18 Volts. La tension est donc dans tous les cas de fonctionnement plus basse que celle des batteries. Le courant du moteur varie entre -52 et 253 Ampères. La convention pour le courant du moteur est la suivante : un courant positif correspond à un courant prélevé dans les batteries et injecté dans le moteur et un courant négatif correspond à un courant récupéré par le moteur et injecté dans les batteries.

Suite aux mesures réalisées sur ce parcours, l'énergie de freinage est récupérée seulement dans certaines conditions très strictes. En effet, il faut que le scooter circule à vitesse maximale et que la pente (descente) soit suffisamment importante pour qu'une partie de l'énergie de freinage soit réinjectée dans les batteries. En effet, lors des mesures effectuées, il est possible de voir qu'aucune énergie de freinage n'est réinjectée dans les batteries en cas de freinage à vitesse différente de la vitesse maximale.

Peugeot indique que le "Scoot'Elec" utilisé pour faire ces tests récupère l'énergie de freinage lors des décélérations, mais les mesures montrent le contraire. Lors d'une étude détaillée de la structure du véhicule de référence, il a été mis en évidence que le constructeur n'a pas utilisé un convertisseur DC/DC complet bidirectionnel en courant pour alimenter le moteur. Ce choix a été fait par le constructeur principalement pour des questions de coûts. Ainsi, pour la fluence d'énergie des

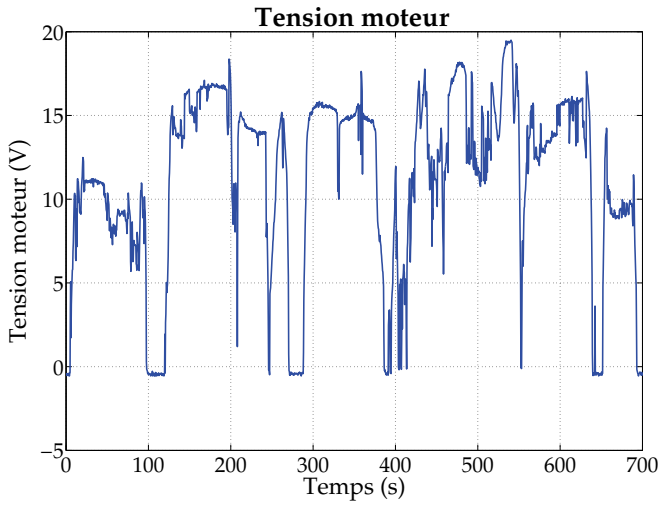


FIG. 6.7 – Tension aux bornes du moteur

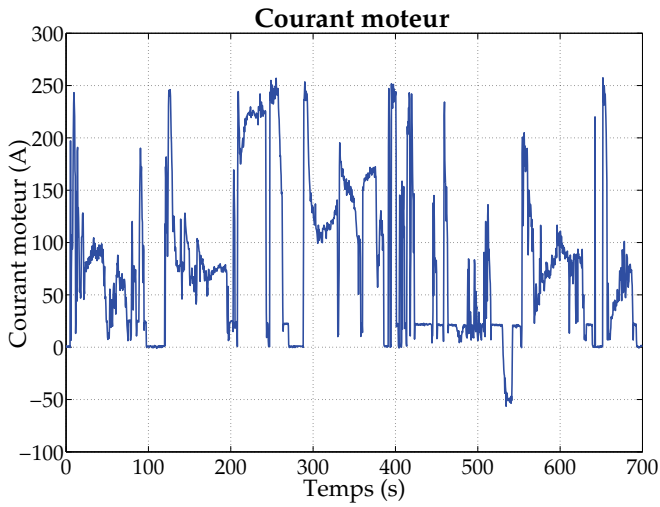


FIG. 6.8 – Courant du moteur

batteries vers le moteur, la partie du convertisseur est complète, dans l'autre sens de la fluence d'énergie, seule une diode est utilisée. Pour pouvoir récupérer l'énergie de freinage, la tension du moteur doit donc être plus élevée que la tension des batteries.

La partie de l'électronique de puissance qu'il faut implémenter pour réaliser la fonction de récupération optimale de l'énergie de freinage au lieu de la dissiper sous forme de chaleur dans les disques de frein n'est pas présentée dans ce travail. En effet, un convertisseur complet bidirectionnel en courant et une adaptation de la stratégie de réglage du convertisseur lors des phases de freinage sont suffisants pour obtenir une récupération optimale théorique de l'énergie de freinage.

La suite de ce chapitre est consacrée à l'étude des solutions pour récupérer l'énergie de freinage de manière optimale. Dans le cas du véhicule de référence, la solution pour récupérer cette énergie est d'utiliser les batteries à bord, mais à cause du faible courant de recharge qu'il est possible de leur appliquer, cette solution n'est pas optimale. La suite de ce chapitre présente une étude concernant l'ajout d'un stockeur d'énergie additionnel embarqué dans le véhicule qui permet de récupérer les pointes de puissance instantanées élevées lors des phases de freinage.

6.4 Le système d'assistance en puissance pour un véhicule électrique

Cette section présente une solution pour réduire les contraintes en puissance sur les batteries par l'ajout d'un stockeur d'énergie additionnel embarqué dans le véhicule. Dans ce cas, l'autonomie du véhicule et la durée de vie des batteries sont augmentées [80] [81]. En effet, l'énergie de freinage peut être récupérée de manière optimale par le stockeur additionnel alors que les batteries ne peuvent pas absorber ces fortes contraintes en courant.

L'utilisation conjointe d'une batterie et d'un banc de supercondensateurs dans un véhicule peut s'effectuer selon deux structures différentes. Le convertisseur statique alimentant le moteur peut être connecté directement soit à la batterie, soit au stockeur d'énergie [12]. Dans le premier cas, le stockeur d'énergie additionnel est connecté à la batterie au travers d'un convertisseur DC-DC. Dans le second cas, c'est la batterie qui est connectée au travers d'un convertisseur DC-DC au stockeur d'énergie

additionnel.

La figure 6.9 représente le schéma bloc du véhicule avec un système d'assistance en puissance. Lors de l'ajout du système d'assistance en puissance embarqué dans le véhicule, la stratégie suivie est de modifier le moins possible la structure du véhicule de référence dans le but de réutiliser le maximum de composants qui existent déjà. Sur la figure 6.9 est représenté en noir le véhicule de référence tel qu'il est actuellement fabriqué par Peugeot. La partie représentée en rouge correspond au système d'assistance en puissance.

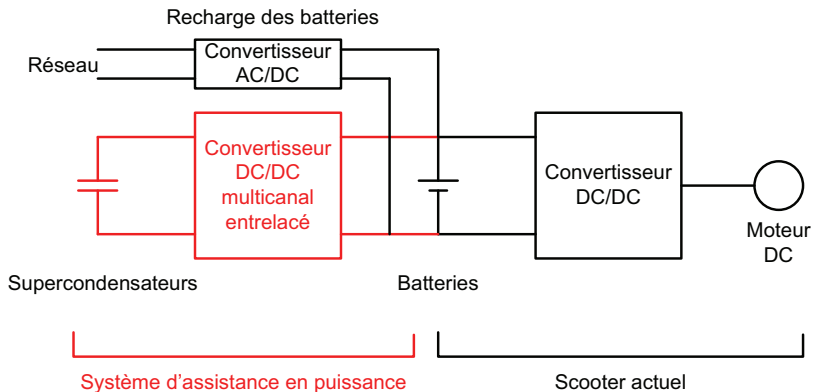


FIG. 6.9 – Schéma bloc du système d'assistance en puissance pour le véhicule de référence

Le système d'assistance en puissance est composé d'un banc de supercondensateurs interfacé avec le bus à tension continue par un convertisseur de type DC/DC multicanal (voir chapitre 7). Dans le véhicule de référence, les batteries sont directement connectées à ce bus de tension continue. Le nombre nécessaire de supercondensateurs pour cette application est déterminé à partir des mesures réalisées sur le parcours de référence. Ce calcul est présenté dans la section suivante.

Dans le système proposé ici, les batteries sont utilisées pour assurer une autonomie suffisante pour le véhicule à cause de leur haute densité énergétique (kWh/kg) alors que les supercondensateurs seront utilisés pour délivrer les pointes de puissance lors des accélérations et de les récupérer lors des freinages à cause de leur haute densité de puissance

(kW/kg).

La première contrainte lors de l'ajout d'un système de stockage d'énergie embarqué dans un petit véhicule tel un scooter est le volume disponible. Dans le cas présenté, le convertisseur DC/DC utilisé pour interfacer le banc stockeur au bus continu est de type multicanal et donc de volume réduit par rapport à un convertisseur standard. Dans le véhicule de référence, les batteries sont dimensionnées pour pouvoir fournir les pointes de puissance maximale lors des accélérations. Pour le cas présenté ici avec le système d'assistance en puissance, les contraintes sur les batteries sont diminuées. Il est donc possible de changer de technologie de batterie et d'utiliser des batteries avec une meilleure densité énergétique (kWh/kg) et ayant une densité de puissance (kW/kg) plus faible. Plus de détails concernant le changement du type de batterie sont donnés dans les sections suivantes.

L'étude présentée dans ce chapitre ne traite pas de la modification de la stratégie de réglage et du convertisseur DC/DC alimentant le moteur de traction pour récupérer l'énergie de freinage de manière efficace, mais présente une étude concernant l'ajout d'un système de stockage d'énergie électrique additionnel pouvant absorber des pointes de puissance de 4 kW, puissance maximale de freinage pouvant être régénérée par le moteur électrique utilisé dans le véhicule de référence.

6.5 Dimensionnement du stockeur d'énergie additionnel

Le calcul de la taille du stockeur d'énergie additionnel, dans ce cas caractérisé par le nombre de supercondensateurs, nécessaire pour réaliser la fonction d'assistance en puissance est effectuée selon les étapes suivantes :

1. Calcul de l'énergie qui doit être stockée dans les supercondensateurs
2. Calcul des contraintes en puissance qui sont appliquées aux supercondensateurs
3. Choix d'un modèle de supercondensateurs
4. Détermination de la structure de la connexion des supercondensateurs dans le banc (connexion série et/ou parallèle des éléments)

5. Changement du type de batteries pour qu'elles soient adaptées aux contraintes qui leur sont appliquées
6. Vérification si le volume laissé libre par les batteries est suffisant pour placer le banc de supercondensateurs

6.5.1 Détermination de l'énergie et de la puissance pour le stockeur d'énergie additionnel

Le calcul de l'énergie à stocker dans le banc de supercondensateurs se fait par analyse des mesures du parcours de référence retenu qui correspond à un parcours typique comportant de fortes contraintes sur les éléments stockeur d'énergie. Les buts recherchés lors de l'ajout du système d'assistance en puissance sont les suivants :

- La puissance moyenne est fournie par les batteries
- Toutes les variations de puissance sont fournies par le banc de supercondensateurs.

La figure 6.10 représente ces différentes puissances. La courbe bleue correspond à la puissance utile du moteur. La puissance moyenne, délivrée par les batteries, est donnée par la courbe verte. Elle est de 1.026 kW. La courbe rouge représente la puissance qui est fournie, respectivement récupérée par le banc de supercondensateurs. La puissance maximale délivrée par le stockeur d'énergie additionnel est de 2.3 kW et la puissance maximale récupérée est de 1.7 kW. Dans le cas où la stratégie pour la récupération de l'énergie de freinage est modifiée, la puissance maximale absorbée par le banc de supercondensateurs est de 4 kW (puissance maximale du moteur) plus 1.026 kW (puissance moyenne délivrée par les batteries) et vaut donc 5.026 kW.

La figure 6.11 représente la variation d'énergie dans le banc de supercondensateurs lors du parcours de référence. Ce graphique est obtenu par intégration temporelle de la courbe de puissance du stockeur d'énergie additionnel. Il est à noter que le niveau d'énergie est nul au début et à la fin du parcours pour le stockeur additionnel et donc son bilan énergétique est nul après le parcours complet. L'excursion maximale en énergie est de 169.5 kJoules et correspond à l'énergie qui doit pouvoir être stockée par le banc de supercondensateurs.

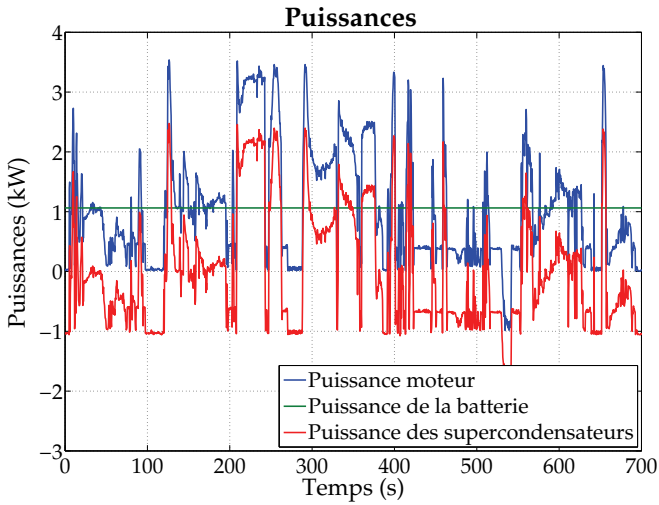


FIG. 6.10 – Caractéristique des puissances pour la détermination de la taille du stockeur d'énergie additionnel

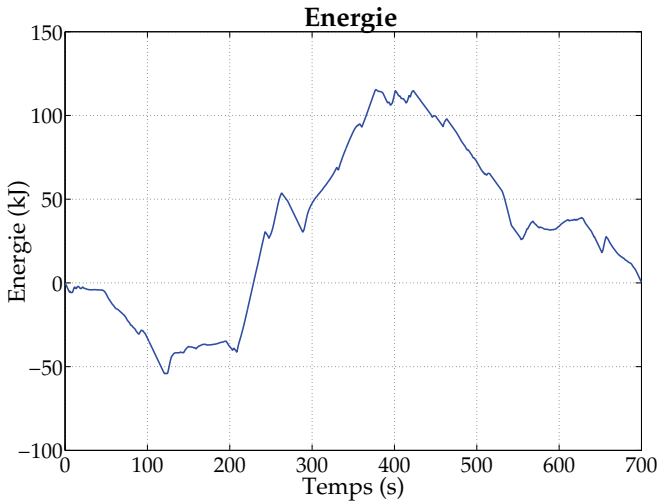


FIG. 6.11 – Caractéristique de l'énergie pour la détermination de la taille du stockeur

6.5.2 Modèle de supercondensateurs retenu

Le modèle retenu de supercondensateurs pour cette application est : Maxwell Technologies, BCAP0010. Ce modèle est retenu car c'est celui qui a la plus grande densité en énergie (valeurs 2005), sans que la limitation de puissance ne soit atteinte pour l'application présentée dans ce chapitre. Les caractéristiques de ce modèle de supercondensateurs sont données dans le tableau 6.3.

Valeur de la capacité	2 600 Farads
Tension nominale	2.5 V
Tension peak maximale	2.8 V
Résistance série	0.7 m Ω
Densité de puissance	4 300 W/kg
Courant maximum	600 A
Energie maximale stockée	8 125 J
Densité d'énergie	4.3 Wh/kg (2.5 V)
Masse	525 g
Volume	0.42 l
Durée de vie	10 ans
Nombre de cycles	500 000 cycles

TAB. 6.3 – Caractéristiques des supercondensateurs
BCAP0010

6.5.3 Détermination du nombre de supercondensateurs nécessaire

La durée de vie des supercondensateurs est de 500 000 cycles et est obtenue si le niveau de tension minimale atteint par chaque élément est limité à la moitié de leur tension nominale. De plus, cette limite sur la tension garantit également un bon rendement pour les supercondensateurs. Pour le modèle retenu de supercondensateur, chaque élément est utilisé entre 1.25 et 2.5 Volts. Suite à cette limitation, l'énergie stockée par chaque élément correspond à 75 % de la valeur donnée par le fabricant.

En prenant en compte le rendement à la charge et à la décharge, le

nombre de supercondensateurs nécessaire pour stocker les 169.5 kJoules est de 29 éléments BCAP0010. A partir du courant maximal et de la tension minimale, il est possible de calculer la puissance maximale fournie par un élément pour le pire des cas : $600\text{ A} \cdot 1.25\text{ V} = 750\text{ W}$. Pour le banc de 29 supercondensateurs, la puissance maximale fournie est donc de 21.7 kW. Cette valeur est bien plus importante que les 5.026 kW requis. Dans cette application, le nombre de supercondensateurs est donc défini selon un critère "énergie".

La masse du banc de supercondensateurs est de 15.2 kg et son volume de 12.2 l, sans compter le système d'équilibrage des tensions et les supports mécaniques pour les éléments.

6.5.4 Détermination de la structure du banc de supercondensateurs

Cette section présente l'arrangement retenu (branchement série et/ou parallèle) des supercondensateurs pour la réalisation du banc. Le tableau 6.4 présente les solutions possibles pour la structure du banc. Les problèmes liés à la mise en série des supercondensateurs ne sont pas traités ici car des solutions pour l'équilibrage des tensions entre chaque élément existent déjà. La plage de variation de tension aux bornes du

	Série	Parallèle	Total	Umax [V]	U min [V]	I max [A]
1	29	1	29	72.5	36.3	137
2	15	2	30	37.5	18.8	267
3	10	3	30	25	12.5	402
4	8	4	32	20	10	503
5	6	5	30	15	7.5	670
6	5	6	30	12.5	6.3	804
7	4	8	32	10	5	1005
8	3	10	30	7.5	3.8	1323
9	2	15	30	5	2.5	2010
10	1	29	29	2.5	1.3	4020

TAB. 6.4 – Arrangements possibles des supercondensateurs dans le banc

banc de supercondensateurs est directement liée au nombre d'éléments branchés en série. Il est par la suite possible de déterminer le courant maximal qui est prélevé sur le banc dans les conditions les plus défavorables caractérisées par une puissance absorbée de 5.026 kW et par une tension du banc minimale.

Un convertisseur de type DC/DC est utilisé pour interfacer le banc de supercondensateurs au bus de tension continue dont la tension est fixée à 18 Volts par les batteries. Dans le cas où la tension des supercondensateurs est soit toujours plus grande ou soit plus petite que la tension du bus continu, la réalisation du convertisseur peut se faire avec un rendement élevé car un seul étage de conversion est nécessaire. Dans le cas contraire, il faut recourir à un double étage de conversion et donc le rendement est plus faible.

Le convertisseur retenu pour cette application est de type multical et est présenté dans le chapitre 7. Suite au calcul du rendement de ce convertisseur pour les différents cas, le meilleur rendement est trouvé pour le cas 1, c'est-à-dire lorsque tous les supercondensateurs sont connectés en série dans le banc. Dans ce cas, la tension aux bornes du stockeur d'énergie additionnel est la plus élevée et donc le courant est le plus faible, ce qui se traduit par une importante réduction des pertes par conduction et une faible augmentation des pertes par commutation par rapport à un cas basse tension. De plus, avec cette solution, les câbles de connexion ont une section plus faible que dans les autres cas à cause du courant plus faible. Ceci permet de diminuer au maximum la masse totale du système d'assistance en puissance.

La solution retenue est de connecter tous les supercondensateurs en série. Dans ce cas, le banc de supercondensateurs a une tension plus élevée que le bus continu et un convertisseur de type abaisseur est utilisé. Dans la presque totalité des applications utilisant un banc de supercondensateurs, leur tension est toujours plus faible que le bus interne et donc demande un convertisseur de type élévateur. La résistance interne pour le type de supercondensateur retenu est de 0.7 m Ω (tableau 6.3). La résistance série du banc composé de 29 éléments est donc de 20.3 m Ω . Dans les mêmes conditions de fonctionnement que présenté dans la section 6.3 où la puissance utile pour le véhicule est de 3.5 kW, les pertes internes dans le banc de supercondensateurs sont de 185 W dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire lorsque la tension du banc est la plus faible. Les pertes internes sont ainsi diminuées de 68 % lors de l'utilisa-

tion de supercondensateurs au lieu de batteries pour fournir les mêmes contraintes en puissance.

6.5.5 Changement du type de batteries

Comme les contraintes sur les batteries sont modifiées lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance, il est dès lors possible de remplacer les batteries actuelles du véhicule de référence par un modèle ayant de meilleures caractéristiques pour les nouvelles contraintes qui leurs sont appliquées. Le volume et la masse des batteries peuvent ainsi être réduits tout en conservant la même autonomie pour le véhicule. Les différents types de batteries étudiés dans cette section ainsi que leurs propriétés sont donnés dans le tableau 3.1.

Pour la suite des considérations faites dans ce chapitre, le type de batterie retenu pour remplacer les batteries actuelles du véhicule de référence est le lithium-polymère car c'est cette technologie qui possède la plus grande densité en énergie pour les technologies de batteries adaptées pour une application dans un véhicule. En considérant le cas le plus défavorable, la densité en énergie de ce type de batterie est de 100 Wh/kg. Pour avoir la même autonomie que le véhicule de référence, une énergie de 1800 Wh doit être stockée dans les batteries. La masse des batteries est de 18 kg et leur volume est de 12.2 litres. Les contraintes en puissance appliquées sur les batteries lors de l'ajout d'un système d'assistance en puissance peuvent être fournies par tous les types présentés dans le tableau 3.1 et plus particulièrement pour le cas des batteries lithium-polymère où la puissance maximale délivrée est de 3.6 kW. Le tableau 6.5 représente le résumé des masses et des volumes nécessaires pour le système d'assistance en puissance par rapport au véhicule de référence.

Suite à ces calculs, il est mis en évidence que le système d'assistance en puissance tel que proposé dans ce chapitre est compatible pour une question de masse et de volume avec le véhicule de référence. En effet, la masse totale du système de stockage d'énergie est de 37.2 kg pour le véhicule avec un système d'assistance en puissance alors qu'elle est de 38.4 kg pour le véhicule de référence. Les performances dynamiques sont identiques entre les deux cas car la masse totale du véhicule est identique. Quant au volume, il est supérieur de 5.6 litres pour le cas de l'assistance en puissance. Ce volume peut être trouvé à bord du

		Masse	Volume
Véhicule de référence	Batteries	38.4 kg	23.6 l
Véhicule proposé	Batteries	18 kg	12 l
	Supercondensateurs	15.2 kg	12.2 l
	Convertisseur	4 kg	5 l
	Total	37.2 kg	29.2 l

TAB. 6.5 – Comparaison des masse et volume entre le véhicule de référence et le véhicule avec un système d'assistance en puissance

véhicule de référence par l'utilisation des espaces de rangements ou par adaptation de la carrosserie du véhicule de 5.6 l.

6.6 Régulation pour la gestion énergétique dans le véhicule

Cette section présente un système de régulation spécialement développé pour cette application. Elle est séparée en deux parties distinctes : la première concerne le lissage de la puissance des moteurs et la seconde concerne la recharge du stockeur d'énergie additionnel. La figure 6.12 représente le schéma bloc de la stratégie développée.

La première partie concernant le calcul du lissage des pointes de courant consiste à calculer la moyenne glissante de la puissance absorbée par les moteurs. Un calcul de la moyenne glissante $\langle P_{mo} \rangle$ de la puissance utilisée par le moteur est basé sur les mesures de la tension et du courant à ses bornes. La puissance qui est délivrée par le banc de supercondensateurs est donnée par :

$$P_{sc} = P_{mo} - \langle P_{mo} \rangle \quad (6.2)$$

La seconde partie de la régulation est utilisée pour gérer la recharge du stockeur d'énergie additionnel. Dans ce cas, la moyenne de l'erreur entre une valeur de consigne pour la tension du banc de supercondensateurs et sa tension mesurée est calculée et un régulateur de type proportionnel est utilisé pour déterminer la puissance de recharge des supercondensateurs. La tension de consigne du banc de supercondensateurs

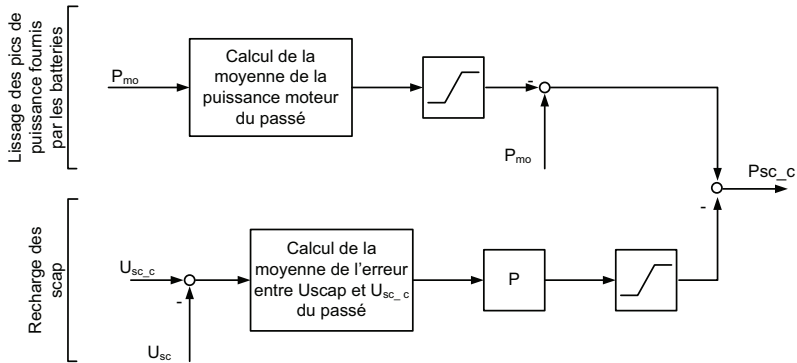


FIG. 6.12 – Schéma de régulation pour la gestion énergétique à bord du véhicule

est définie après le calcul de l'énergie pouvant être stockée à bord du véhicule lors des freinages.

Des limiteurs de puissance sont utilisés dans les deux parties du régulateur. En soustrayant la puissance de recharge du banc de supercondensateurs (partie 2) de la moyenne de la puissance du moteur (partie 1), le signal de commande de la puissance du stockeur d'énergie est déterminé.

La puissance finale délivrée ou injectée dans les batteries est donnée par la soustraction de la puissance due au calcul de la moyenne de la puissance délivrée par les batteries et de la puissance nécessaire pour la recharge du banc de supercondensateurs.

Aucun régulateur n'est nécessaire pour les batteries car elles sont directement connectées au niveau du bus de tension continue à bord du véhicule.

6.7 Simulations du véhicule avec un système d'assistance en puissance

Des simulations du véhicule complet avec un système d'assistance en puissance ont été réalisées avec le logiciel Simplorer (Ansoft). La puissance consommée par les moteurs prise comme référence pour les

6.7. Simulations du véhicule avec un système d'assistance en puissance

simulations correspondent aux mesures réalisées pour le parcours de référence. Lors de ces simulations, aucune modification n'a été effectuée sur la stratégie de récupération de l'énergie de freinage tel que Peugeot l'a implémenté.

Les figures 6.13, 6.14 et 6.15 représentent les différentes puissances à bord du véhicule électrique. La figure 6.13 représente la puissance au niveau du moteur et correspond à la courbe mesurée pour le parcours type. La convention retenue est qu'une puissance positive correspond à une puissance consommée par le moteur alors qu'une puissance négative correspond à une puissance récupérée par le moteur. Cette puissance est la référence pour la courbe de charge du moteur de traction dans toutes les simulations qui vont suivre.

La figure 6.14 représente la puissance délivrée par les batteries lorsque le véhicule a un système d'assistance en puissance. Par rapport au cas d'un véhicule électrique standard où la puissance des moteurs est directement prélevée dans les batteries, la puissance des moteurs est découplée de celle délivrée par les batteries. Par l'ajout du système d'assistance en puissance, les contraintes sur les batteries sont diminuées

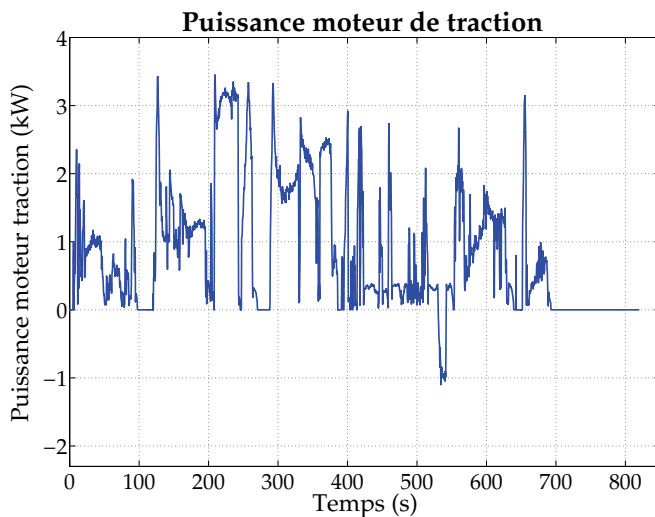


FIG. 6.13 – Résultat des simulations : Puissance du moteur

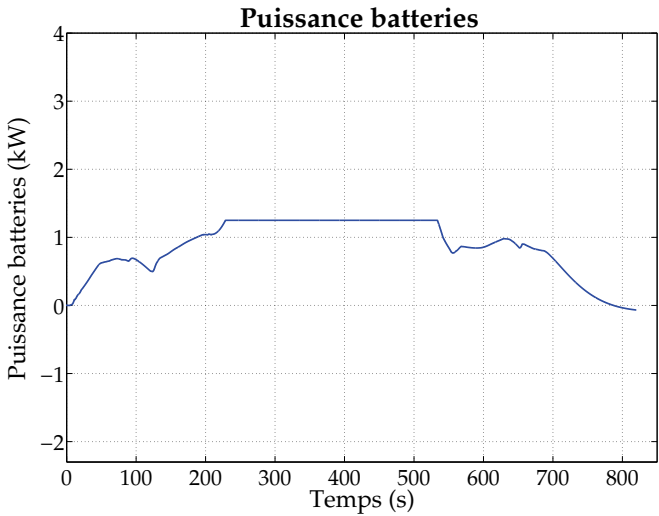


FIG. 6.14 – Résultat des simulations : Puissance des batteries

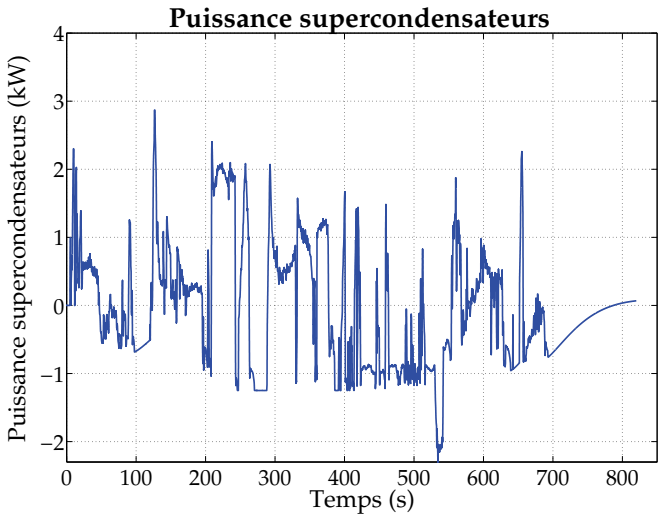


FIG. 6.15 – Résultat des simulations : Puissance du banc de supercondensateurs

6.7. Simulations du véhicule avec un système d'assistance en puissance

d'un grand facteur : la puissance maximale délivrée par les batteries est réduite de 3.5 kW à 1.2 kW et aucune composante haute fréquence ne se retrouve sur la puissance des batteries.

La figure 6.15 représente la puissance délivrée, respectivement récupérée par le banc de supercondensateurs. Lors du parcours complet, la puissance moyenne est nulle, c'est-à-dire que le niveau de charge du stockeur d'énergie additionnel est le même au début et à la fin du parcours. A la fin du parcours, le banc de supercondensateurs est donc chargé et prêt pour un nouveau cycle. Toutes les composantes haute fréquence de la puissance des moteurs se retrouvent sur la puissance délivrée par les supercondensateurs. Ainsi, il se comporte en tampon d'énergie entre les batteries et le moteur.

Les figures 6.16 et 6.17 représentent les caractéristiques des batteries. La figure 6.16 représente la tension à leurs bornes et montre les pertes ohmiques internes des batteries. La tension minimale aux bornes du banc de batteries est de 17.05 Volts alors que pour le véhicule de référence, elle est de 13.5 Volts. Ceci s'explique par le courant plus faible qui y est prélevé. La figure 6.17 représente le courant délivré par les

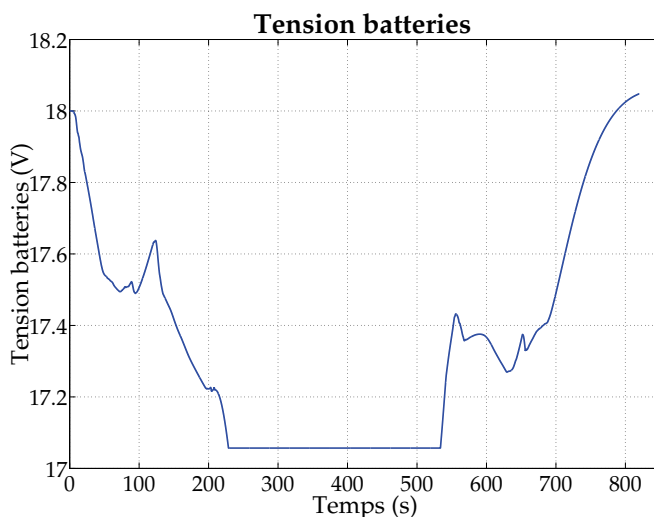


FIG. 6.16 – Résultat des simulations : Tension des batteries

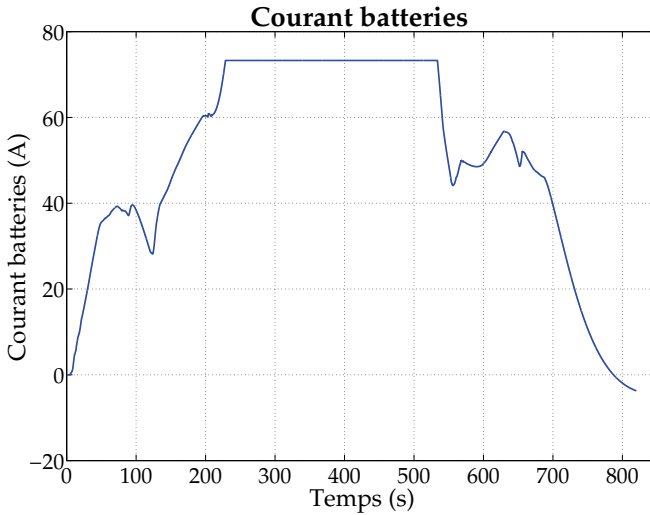


FIG. 6.17 – Résultat des simulations : Courant des batteries

batteries; la valeur maximale est de 75 Ampères alors qu'elle est de 245 Ampères pour le véhicule de référence. Les contraintes appliquées aux batteries sont ainsi sensiblement réduites, ce qui implique une plus grande durée de vie de ces dernières ainsi qu'un meilleur rendement énergétique du véhicule.

Les figures 6.18 et 6.19 représentent les caractéristiques du banc de supercondensateurs. Le banc est composé de 29 supercondensateurs branchés en série, la tension maximale est de 72.5 Volts alors que la tension minimale est de 36.3 Volts. Dans les résultats des simulations, la variation de la tension aux bornes des supercondensateurs est comprise entre 39 à 72 Volts. La totalité de la plage d'utilisation des tensions est donc utilisée au cours du parcours et cela confirme le bon dimensionnement du stockeur d'énergie additionnel. La figure 6.19 représente les variations de courant et la convention retenue est qu'un courant positif correspond à un courant prélevé sur le stockeur additionnel. La fréquence du courant est égale à celle du moteur de traction. Ainsi, les contraintes appliquées par le moteur de traction sur le système de stockage d'énergie sont répercutées sur le banc de supercondensateurs et

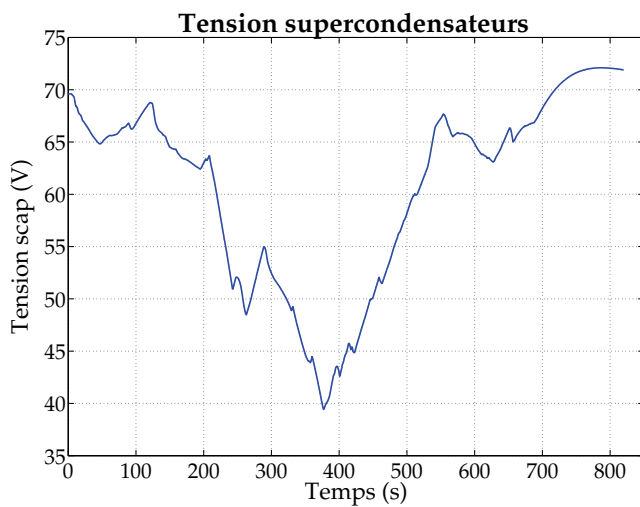


FIG. 6.18 – Résultat des simulations : Tension du banc de supercondensateurs

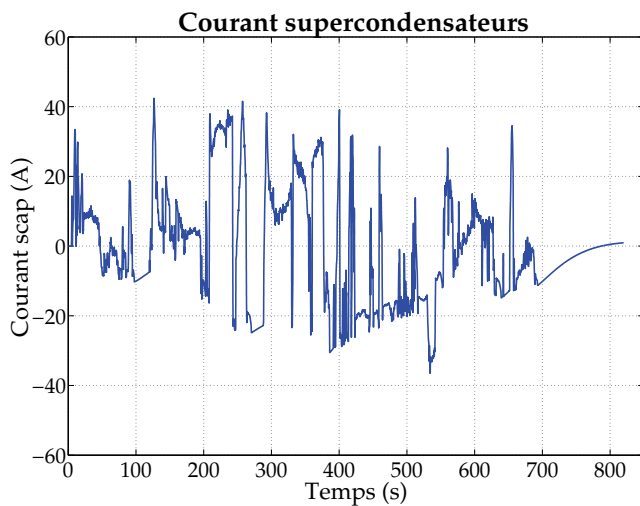


FIG. 6.19 – Résultat des simulations : Courant du banc de supercondensateurs

non sur les batteries.

6.8 Conclusion

Ce chapitre présente le concept d'assistance en puissance pour un véhicule électrique léger de type scooter électrique dont la source d'énergie principale est composée de batteries. Bien que l'exemple d'application est un scooter, les mêmes méthodes et concepts peuvent être appliqués à tout autre type de véhicule dont la source d'énergie principale est composée de batteries. Ce chapitre présente la problématique des contraintes en puissance appliquées sur les batteries lors de l'utilisation d'un véhicule électrique et propose une solution pour les diminuer par l'ajout d'un système de stockage d'énergie embarqué de type supercapacitif.

Le fait de diminuer les contraintes sur les batteries a les effets suivants sur le véhicule :

- Augmentation de la durée de vie des batteries
- Augmentation de l'autonomie du véhicule ; dans le véhicule de référence sans système d'assistance en puissance, jusqu'à 33 % de l'énergie fournie par les batteries est dissipée dans leur résistance interne
- Possibilité de changer le type de batteries

L'étude présentée dans ce chapitre est réalisée en prenant en compte un véhicule électrique du marché comme véhicule de référence : le Peugeot Scoot'Elec. Avec ce modèle de véhicule, des mesures ont été réalisées dans la ville de Lausanne pour déterminer précisément les contraintes appliquées sur l'élément stockeur d'énergie, dans ce cas un banc de batteries. Un parcours de référence a été défini et il représente une application typique d'utilisation d'un véhicule électrique léger. Il se situe en milieu citadin, présente un grand nombre de phases accélération - freinage, des montées et des descentes.

Suite aux mesures réalisées dans ce chapitre, le véhicule de référence ne récupère l'énergie de freinage que dans des situations bien précises qui sont liées à la structure de l'électronique de puissance embarquée et aux limitations liées à l'utilisation de batteries. Ce chapitre ne traite pas le sujet concernant cette modification de la stratégie de réglage à bord du véhicule, mais présente une solution qui permet, du point de vue

des éléments stockeur d'énergie, de récupérer cette énergie de manière optimale.

La solution présentée dans ce chapitre consiste à remplacer la batterie d'origine Nickel-Cadmium par une batterie lithium-polymère avec un banc de supercondensateurs interfacée par un convertisseur DC/DC. Le banc de supercondensateurs nécessaire dans le cas d'un véhicule de type scooter est composé de 29 éléments de 2600 Farads branchés en série. La masse du système proposé, incluant la batterie, les supercondensateurs et l'électronique de puissance est 1.2 kilo moins lourd que le système initial. Quand au volume, il est de 5.6 litres plus important. Le système présenté est donc compatible avec une application pour un scooter électrique, tout en conservant les mêmes performances dynamiques du véhicule.

Le fait d'ajouter un système d'assistance en puissance embarqué dans le véhicule permet de : diminuer les contraintes sur les batteries, récupérer de manière efficace l'énergie de freinage et augmenter le rendement énergétique total du véhicule.

Chapitre 7

Convertisseur statique associé au stockeur d'énergie

7.1 Introduction

Les chapitres précédents ont présenté comment un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué dans un véhicule permet de diminuer sa consommation énergétique. La structure interne de connexion entre le stockeur d'énergie et les autres composants de la traction a été donnée pour chacun des cas exposés dans les chapitres 4, 5 et 6. Dans tous les véhicules présentés, un convertisseur statique doit être ajouté pour gérer les différents flux énergétiques à bord du véhicule, pour adapter les niveaux de tension entre les différents éléments de traction et pour contrôler la charge et la décharge du stockeur d'énergie.

Le type de stockeur d'énergie qui a été retenu dans cette thèse est le supercondensateur. Avec ce type de composant, la tension à ses bornes est directement liée à son état de charge : $E_{cap} = 0.5 \cdot C_{scap} \cdot U_{sc}^2$. Ainsi, elle varie en fonction de son état de charge. Le convertisseur statique est utilisé pour adapter le niveau de tension entre cette tension variable

et le bus à tension continue à bord du véhicule. Dans la majorité des cas, le taux de décharge des supercondensateurs est fixé à 0.5 pour leur garantir un bon rendement et une durée de vie suffisante. La tension aux bornes du banc de supercondensateurs varie donc entre la pleine tension et la moitié de la tension nominale.

Un convertisseur de type DC/DC est utilisé entre le banc de supercondensateurs et le bus à tension continue. Pour une application mobile, le poids des composants passifs d'un convertisseur standard, notamment son inductance de lissage, peut s'avérer problématique et un autre type de convertisseur doit être utilisé.

Ce chapitre étudie la structure d'un convertisseur adapté pour les applications mobiles et présente la réalisation d'un prototype pour une application spécifique. Les critères poids et volume du convertisseur sont très importants. De plus, pour maximiser le rendement énergétique des véhicules ayant un système d'assistance en puissance, le rendement du convertisseur doit être aussi élevé que possible.

Le convertisseur présenté dans ce chapitre est de type DC/DC multicanal entrelacé fonctionnant en mode de conduction discontinue tout en exploitant la propriété de la conduction inverse des transistors MOS.

7.2 Principe du convertisseur DC/DC multicanal entrelacé

Un convertisseur de type DC/DC est spécialement développé dans le cadre de cette étude pour des applications de type mobile où les critères de poids, de volume et de rendement sont importants. Le rendement du convertisseur étudié est supérieur à celui d'un convertisseur standard alors qu'il nécessite des composants passifs de taille beaucoup plus petite.

La figure 7.1 représente le schéma du convertisseur étudié qui est composé de la mise en parallèle de plusieurs convertisseurs DC/DC. Le nombre de convertisseurs montés en parallèle est déterminé par la recherche du meilleur compromis en fonction de la puissance, du rendement, de la taille des inductances, du poids, etc. Une méthode pour déterminer le nombre de branches du convertisseur est présentée dans la suite de ce chapitre pour une application particulière.

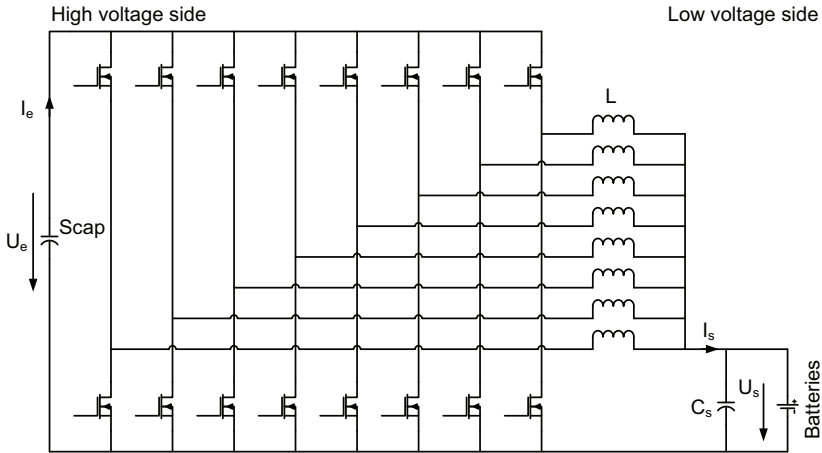


FIG. 7.1 – Schéma du convertisseur DC/DC multicanal entrelacé

Dans la figure 7.1, les supercondensateurs sont branchés du côté haute tension du convertisseur alors que les batteries sont branchées du côté basse tension. Cette structure de connexion est inversée par rapport aux montages conventionnels où les batteries sont connectées du côté haute tension lors de l'interfaçage avec un banc de supercondensateurs. La raison de ce choix est présentée dans la section décrivant l'application pour laquelle le convertisseur est développé.

Les propriétés de ce convertisseur sont les suivantes :

- Mise en parallèle de plusieurs convertisseurs élémentaires
- Entrelacement de chaque canal
- Utilisation du mode de conduction discontinue
- Conduction inverse des transistors MOS

7.2.1 Mise en parallèle de plusieurs convertisseurs élémentaires

Le fait de mettre plusieurs convertisseurs en parallèle permet de diviser le courant total circulant dans le convertisseur par le nombre de

canaux. Dans ce cas, les pertes par conduction ($R_{dson} \cdot I^2$) sont diminuées, mais l'ajout de convertisseurs en parallèle augmente les pertes par commutation. En effet, le nombre de semiconducteurs de puissance devant commuter au cours d'une période de commutation est augmenté. Le nombre de branches en parallèle est donc déterminé par la recherche du meilleur compromis entre diminution des pertes par commutation, augmentation des pertes par commutation et des ondulations sur le courant total. Pour le convertisseur étudié dans ce chapitre, chaque branche comporte sa propre inductance de lissage. Des études concernant l'utilisation d'inductances couplées pour diminuer les ondulations de courant ont été faites et sont présentées dans [82].

Les pertes par commutation sont dépendantes de la période de commutation et du nombre de canaux utilisés dans le convertisseur. Dans le cas où la fréquence de commutation reste identique, le fait d'utiliser 8 branches augmente les pertes par commutation d'un facteur 8 si les transistors utilisés sont identiques. Une solution pour diminuer cet effet est décrit dans les paragraphes suivants.

Les pertes par conduction sont principalement dépendantes de la résistance de passage R_{dson} des transistors MOS multipliée par le carré du courant. Par exemple, doubler le courant dans une branche revient à quadrupler les pertes par conduction ; doubler le courant par l'ajout d'un second canal revient à seulement doubler les pertes par conduction.

En plus de diminuer les pertes par conduction, la structure proposée permet d'augmenter le taux de fiabilité du convertisseur [83], critère important pour une application de type mobile. En effet, en cas de défaillance sur une des branches, il est possible de la déconnecter et de continuer à exploiter le convertisseur avec des performances dégradées. Ce mode de fonctionnement est très important dans des applications mobiles car il est ainsi toujours possible de déplacer le véhicule de manière autonome jusqu'au point de réparation le plus proche.

7.2.2 Entrelacement de chaque canal

La structure du convertisseur est composée de plusieurs canaux en parallèle. Chaque canal est indépendant et comporte sa propre inductance de lissage. Il est ainsi possible d'introduire une logique de commande qui permet d'entrelacer chaque canal. L'angle entre chaque canal est déterminé par la relation suivante :

$$\text{Déphasage } [^\circ] = \frac{360^\circ}{N_{\text{can}}} \quad (7.1)$$

Le courant total du convertisseur correspond à la somme de plusieurs courants ondulants, chacun déphasé. La fréquence des oscillations du courant total est donnée par :

$$f_{c_{\text{total}}} = f_p \cdot N_{\text{can}} \quad (7.2)$$

Avec :

- $f_{c_{\text{total}}}$: Fréquence des oscillations du courant total
- f_p : Fréquence de commutation de chaque branche
- N_{can} : Nombre de canaux

Par l'addition de tous ces courants déphasés, les oscillations du courant total sont réduites par rapport à l'amplitude des oscillations du courant dans chaque canal [84]. Ainsi, pour une ondulation totale de courant donnée, les inductances de chaque canal sont de plus faible valeur que l'inductance utilisée pour un convertisseur de type standard [85].

7.2.3 Utilisation du mode de conduction discontinue

Le déphasage introduit entre chaque canal est utilisé pour lisser le courant total du convertisseur. Ainsi, pour avoir les mêmes ondulations de courant que pour un convertisseur de type standard, la valeur des inductances peut être réduite par un facteur élevé pour le cas du convertisseur entrelacé. Comme chaque canal a sa propre inductance de lissage, il est possible d'utiliser chaque canal en mode de conduction discontinue. Les 2 principaux avantages de l'utilisation de ce mode discontinu sont les suivants :

- Il n'y a pas besoin de système d'équilibrage du courant entre chaque canal.
- Le rendement global du convertisseur est plus élevé.

L'absence de système d'équilibrage du courant entre chaque canal est due au fait que le courant dans l'inductance s'annule à la fin de chaque période de commutation. Ainsi chaque canal est "réinitialisé" au début de chaque période de commutation. La répartition du courant dans chaque canal de manière uniforme est réalisée naturellement par le convertisseur et la logique de commande n'a pas besoin de prendre

en compte ce phénomène lié au partage du courant. Ceci est présenté en détails dans le paragraphe 7.4.1.

L'utilisation du mode de conduction discontinue pour chaque canal permet d'augmenter le rendement global du convertisseur par rapport à l'utilisation du mode de conduction continue. En effet, ce mode de conduction discontinue permet de diminuer les pertes par commutation pour chaque branche. La figure 7.2 présente le schéma élémentaire pour une branche du convertisseur et y définit les interrupteurs K1 et K2. La figure 7.3 présente les graphiques des commutations des deux interrupteurs pour un cas de fonctionnement "boost" du convertisseur, c'est-à-dire pour une fluence d'énergie du côté basse tension vers le côté haute tension. La figure 7.4 représente le courant dans l'inductance pour un période complète de commutation.

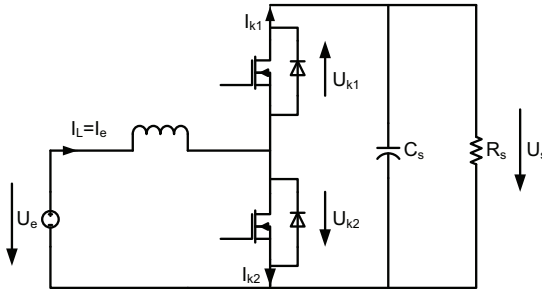


FIG. 7.2 – Définition des courants et tensions pour les pertes par commutations

La structure des commutations est la suivante pour le cas de fonctionnement "boost" :

- 0 – Début de la période de commutation, le courant dans l'inductance I_L est nul, les deux transistors sont bloqués, les tensions et courants dans les interrupteurs sont : $U_{K1} = U_e - U_s$, $I_{K1} = 0$, $U_{K2} = U_e$ et $I_{K2} = 0$.
- 1 – Enclenchement du transistor K2, le courant dans l'inductance commence à croître, les tensions et les courants dans les interrupteurs sont : $U_{K1} = -U_s$, $I_{K1} = 0$, $U_{K2} = 0$ et $I_{K2} = I_e$. Le parcours dans le graphique U-I montre que cette commutation n'est pas dissipative (pas de passage dans le quadrant $U \cdot I$ positif).

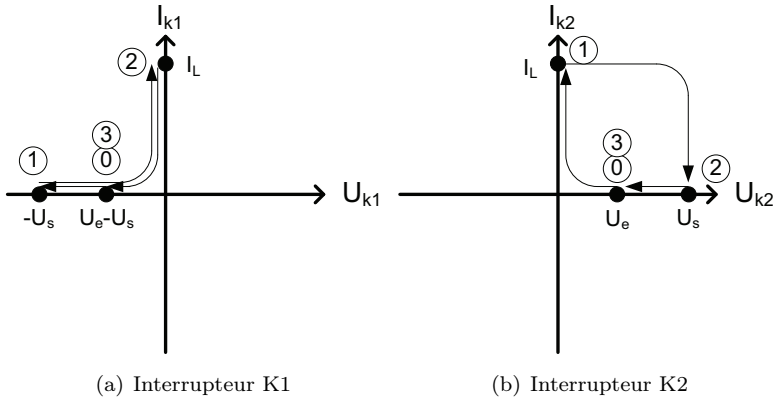


FIG. 7.3 – Graphique des commutations pour une branche

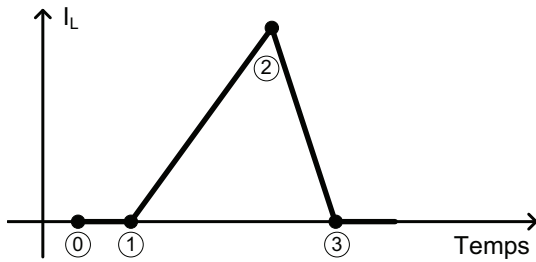


FIG. 7.4 – Graphique du courant dans un canal

- 2 – Blocage du transistor K2, enclenchement de K1, le courant dans l'inductance est à sa valeur maximale et commence à décroître, les courants et les tensions dans les interrupteurs sont : $U_{K1} = 0$, $I_{K1} = I_e$, $U_{K2} = U_s$ et $I_{K2} = 0$. Selon les lois des commutations, l'amorçage de K1 ne peut se faire qu'en longeant les axes U-I et le blocage de K2 ne peut se faire qu'en passant dans le quadrant $U \cdot I$ positif. Ceci se traduit par des pertes par commutation lors du passage dans le quadrant positif.
- 3 – Blocage de K1, le courant dans l'inductance s'annule et l'interrupteur K1 se bloque spontanément, les courants et les tensions sont : $U_{K1} = U_e - U_s$, $I_{K1} = 0$, $U_{K2} = U_e$ et $I_{K2} = 0$. Selon les lois des commutations, ces transitions s'effectuent en longeant les axes U-I; cette commutation n'est pas dissipative. Les phénomènes de recouvrement de la diode n'ont pas d'effets sur le rendement global car le courant circulant dans la branche est nul.

Les principes de commutations décrits ci-dessus sont également valables lorsque le convertisseur fonctionne en mode "buck". Dans ce cas, les seules pertes par commutation surviennent lors du blocage du transistor principal et de l'amorçage de la diode de roue libre, de manière analogue au cas de fonctionnement "boost".

Dans le cas d'un convertisseur fonctionnant en mode de conduction discontinue, les pertes lors du blocage du transistor principal et de l'amorçage de la diode sont calculées de manière analogue au cas de fonctionnement en mode continu. La différence entre ces deux modes est significativement différente lorsque l'enclenchement du transistor entraîne un blocage spontané de la diode pour un cas de fonctionnement en mode continu. En effet, cette commutation est dissipative à cause du passage dans le quadrant U-I positif et est encore amplifiée par les phénomènes de recouvrement de la diode; cette commutation est beaucoup plus dissipative que la commutation blocage du transistor - amorçage de la diode. Cette commutation n'est pas dissipative dans le cas de fonctionnement en mode de conduction discontinue comme montré dans le paragraphe précédent.

Ainsi, le mode de conduction discontinue permet de réduire les pertes par commutation par un important facteur par rapport à un mode de conduction continue. Lors du dimensionnement des éléments du convertisseur (principalement les inductances), chaque branche du convertis-

seur doit fonctionner en mode de conduction discontinue dans la totalité de la plage de fonctionnement.

En résumé, l'utilisation de chaque branche en mode de conduction discontinue permet de diminuer les pertes par commutation, le poids et la taille du convertisseur, notamment par l'utilisation d'inductances de plus faible valeur. Le principal inconvénient est que les ondulations de courant dans chaque canal sont très importantes, mais le déphasage introduit entre chaque canal permet de lisser le courant total. Dans ce cas, le lissage du courant est effectué par l'ajout de petits convertisseurs en parallèle, chacun avec son inductance de lissage, au lieu d'utiliser une seule inductance de valeur élevée comme c'est le cas pour un convertisseur de type standard.

7.2.4 Conduction inverse des transistors MOS

Dans un convertisseur DC/DC, la continuité de courant due à l'inductance impose l'utilisation d'une diode de roue libre après la phase de conduction du transistor principal, le courant ne pouvant pas être coupé de manière directe.

La chute de tension due à la résistance de passage des transistors MOS $R_{ds(on)}$ en inverse est plus faible que la chute de tension due à une diode pour un courant de même amplitude. Dans le but d'augmenter le rendement global du convertisseur, un système de commande est développé pour exploiter les propriétés de conduction inverse des transistors MOS au lieu d'utiliser des diodes [86] [87].

Comme chaque canal fonctionne en mode de conduction discontinue, la logique de commande des transistors est la suivante :

- Le transistor qui remplace la diode de roue libre est enclenché après le déclenchement du transistor principal en prenant en compte le temps nécessaire pour l'antichevauchement.
- Le transistor qui remplace la diode de roue libre est déclenché quand la valeur du courant le traversant atteint 0.

7.3 Cahier des charges pour la réalisation du convertisseur

Le but de cette section n'est pas de présenter en détail le contexte pour lequel ce convertisseur est réalisé, mais il consiste à présenter le cahier des charges pour une réalisation pratique.

Le prototype du convertisseur est réalisé dans le contexte de l'augmentation du rendement énergétique d'un scooter électrique par l'ajout d'un système embarqué de stockage d'énergie de type supercapacitif. Le chapitre 6 présente une étude détaillée du système d'assistance en puissance pour ce véhicule.

Le convertisseur développé dans ce chapitre est utilisé pour interfacer un banc de supercondensateurs à un bus à tension continue composé d'une batterie. La tension des batteries est de 18 V et est connectée du côté basse tension du convertisseur. Le banc de supercondensateurs dont la tension est comprise entre 28 et 56 V est connecté du côté haute tension du convertisseur. Cette structure est inversée par rapport à une réalisation standard pour interfacer un banc de supercondensateurs à un bus de tension continue. La tension du côté basse tension est fixée par les batteries et est de 18 V. Le banc de supercondensateurs est composé de plusieurs cellules de 2.7 V ; la connexion entre ces différentes cellules peut être effectuée selon un schéma série ou parallèle et le niveau de tension total du banc est dépendant de cette configuration. Il est possible de réaliser une stratégie standard avec les supercondensateurs du côté basse tension, mais dans ce cas, les courants circulant dans le convertisseur sont plus importants ; les pertes par conduction sont donc plus importantes.

Ainsi, dans le but de diminuer les pertes par conduction dans les câbles et dans le convertisseur, il a été choisi d'élever la tension des supercondensateurs pour avoir une tension plus élevée que celle des batteries dans tous les cas de fonctionnement.

Le cahier des charges du convertisseur est le suivant :

- Côté basse tension : Batteries ; Tension : 18 V ; Courant maximal : 266 A ; Puissance maximale : 4.8 kW
- Côté haute tension : Banc de supercondensateurs ; Tension 28 - 56 V ; Courant maximal : 171 A ; Puissance maximale : 4.8 kW

7.4 Stratégie de commande pour le convertisseur multicanal

7.4.1 Réalisation des signaux de commande

La structure du convertisseur est caractérisée par la mise en parallèle de plusieurs convertisseurs DC/DC élémentaires dont les propriétés de fonctionnement sont données dans la section précédente. La stratégie de réglage du convertisseur complet est représentée dans la figure 7.5.

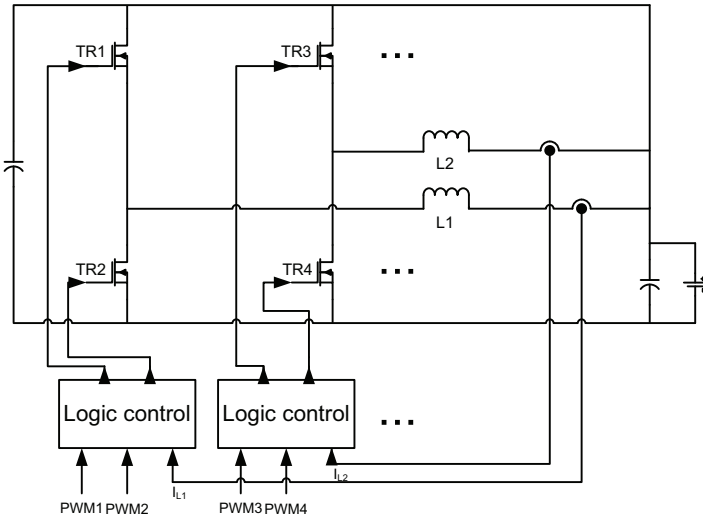


FIG. 7.5 – Stratégie de commande implémentée pour le convertisseur multicanal (représenté ici pour 2 canaux)

Premièrement, chaque canal est entrelacé. Pour réaliser le déphasage entre chaque canal, il suffit de déphaser dans le temps le signal de commande du transistor principal du premier canal. Pour une réalisation pratique, ce déphasage est facilement implémenté dans une FPGA.

Deuxièmement, le courant s'annule dans chaque branche à la fin de chaque commutation. Aucun dispositif de réglage pour équilibrer les courants dans chaque branche n'est nécessaire. En effet, dans le cas où deux canaux ont une dissymétrie, par exemple lorsque l'inductance a

une valeur légèrement différente, seules les pointes de courant ont une amplitude différente. A la fin de la période de commutation, le courant s'annule et ainsi, le courant dans chaque canal est identique au début de la période de commutation suivante. Ce principe est expliqué sur la figure 7.6. Ainsi, dans un cas de fonctionnement en mode de conduction discontinue, il n'y a pas de dérive de courant d'un canal par rapport à un autre.

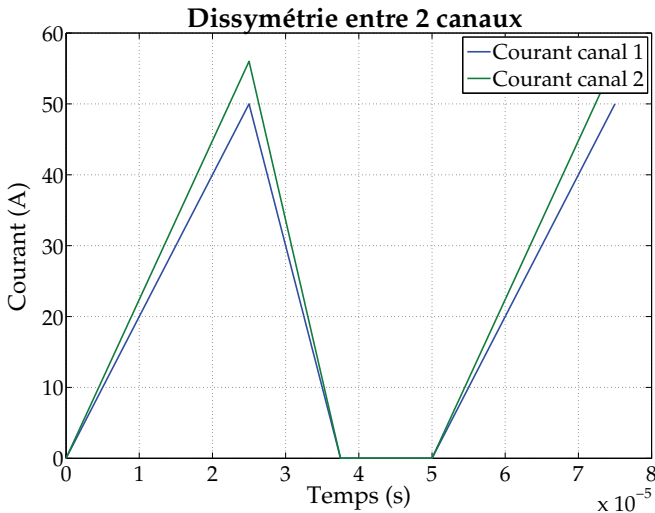


FIG. 7.6 – Conséquence sur le courant dans le cas d’une dissymétrie entre 2 canaux

Troisièmement, un dispositif pour gérer la propriété de la conduction inverse des transistors MOS est réalisé. Ce dispositif doit enclencher le transistor qui fonctionne en mode “diode” après le blocage du transistor principal et bloquer le transistor lorsque le courant dans le canal s’annule. Le signal de commande est réalisé par la combinaison de deux signaux : le premier correspond au signal inversé de la commande du transistor principal (avec le temps d’antichévauchement nécessaire) et le second correspond à la mesure du courant dans le canal (détection lorsqu’il traverse l’axe $I = 0$ A). Dans une réalisation pratique, il est nécessaire de bloquer le transistor avant que le courant n’atteigne la

valeur zéro. Ceci est dû aux temps de blocage des transistors et est fait pour éviter des instabilités dans le système.

7.4.2 Régulateurs pour le convertisseur complet

La section précédente a montré qu'aucun système pour répartir le courant entre les canaux n'est nécessaire pour le convertisseur complet. Un seul régulateur global peut donc être utilisé pour régler l'ensemble du convertisseur. Actuellement, la grande majorité des régulateurs est réalisée de manière numérique où des calculs complexes peuvent être effectués en temps réel pour déterminer le rapport cyclique du convertisseur. La figure 7.7 présente la structure du régulateur réalisé.

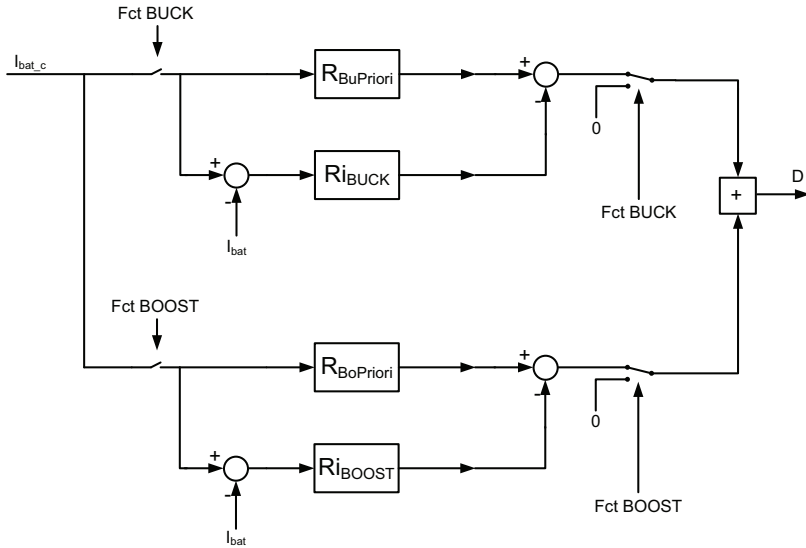


FIG. 7.7 – Régulateur pour le convertisseur multicanal

Ce régulateur est de type à priori avec une correction de type proportionnel-intégral pour corriger les erreurs du modèle à priori. Avec ce type de régulateur, il est possible d'atteindre 95 % de la valeur de consigne en une période de commutation. Le reste étant corrigé par le régulateur PI.

Le convertisseur étant de type bidirectionnel en courant, 2 modes de fonctionnement sont définis en fonction de la direction de la fluence d'énergie dans le convertisseur. Dans le cas où la puissance va du côté basse tension vers le côté haute tension, le mode est dit "BOOST". Dans le cas contraire, le mode est défini comme "BUCK".

Régulateur à priori, fonctionnement "BUCK"

Les équations du régulateur à priori sont déterminées à partir des équations du convertisseur DC/DC multicanal. Dans le cas d'un mode de fonctionnement BUCK, en conduction discontinue, les relations de base sont (cf. annexe A) :

$$\begin{cases} \hat{I} = \frac{U_{sc} - U_{bat}}{L} \cdot D \cdot T_p \\ \hat{I} = \frac{U_{bat}}{L} \cdot \alpha \cdot T_p \end{cases} \quad (7.3)$$

De ces deux équations, il vient :

$$D \cdot U_{sc} = (D + \alpha) \cdot U_{bat} \quad (7.4)$$

Le courant moyen est donné par (cf. annexe A) :

$$\begin{aligned} \langle I \rangle &= \frac{1}{T_p} \cdot \int_0^{T_p} I(t) dt = \\ &= \frac{\frac{U_{sc} - U_{bat}}{L} \cdot D \cdot T_p}{2} \cdot (D + \alpha) \cdot T_p = \\ &= \frac{U_{sc} - U_{bat}}{2 \cdot L} \cdot D^2 \cdot T_p \cdot \frac{U_{sc}}{U_{bat}} \end{aligned} \quad (7.5)$$

D'où :

$$D^2 = \langle I \rangle \cdot \frac{U_{bat}}{U_{sc}} \frac{1}{T_p} \frac{2 \cdot L}{U_{sc} - U_{bat}} \quad (7.6)$$

$$\text{Avec : } \langle I \rangle = \frac{\langle P \rangle / N}{U_{bat}}$$

D'où :

$$D^2 = \frac{\langle P \rangle}{N} \frac{1}{U_{sc}} \frac{1}{T_p} \frac{2 \cdot L}{U_{sc} - U_{bat}} \quad (7.7)$$

Régulateur à priori, fonctionnement "BOOST"

Le principe de recherche des équations pour le mode de fonctionnement BOOST est identique au cas précédent. Dans ce mode de fonctionnement, les équations de base sont (cf. annexe A) :

$$\begin{cases} \hat{I} = \frac{U_{bat}}{L} \cdot D \cdot T_p \\ \hat{I} = \frac{U_{sc} - U_{bat}}{L} \cdot \alpha \cdot T_p \end{cases} \quad (7.8)$$

De ces deux équations, il vient :

$$\begin{aligned} \alpha \cdot U_{sc} &= (D + \alpha) \cdot U_{bat} \\ \alpha(U_{sc} - U_{bat}) &= D \cdot U_{bat} \end{aligned} \quad (7.9)$$

Le courant moyen est donné par (cf. annexe A) :

$$\begin{aligned} \langle I \rangle &= \frac{1}{T_p} \cdot \int_0^{T_p} I(t) dt = \\ &= \frac{U_{sc} - U_{bat}}{2 \cdot L} \cdot \alpha \cdot T_p \cdot (D + \alpha) = \\ &= \frac{U_{sc} \cdot U_{bat}}{2 \cdot L} \cdot \alpha^2 \cdot T_p \cdot \frac{U_{sc}}{U_{bat}} = \\ &= \frac{T_p}{2 \cdot L} \cdot U_{sc} \cdot U_{bat} \cdot D^2 \cdot \frac{1}{U_{sc} - U_{bat}} \end{aligned} \quad (7.10)$$

D'où :

$$D^2 = \langle I \rangle \cdot \frac{2 \cdot L}{T_p} \frac{1}{U_{sc} \cdot U_{bat}} \cdot (U_{sc} - U_{bat}) \quad (7.11)$$

$$\text{Avec : } \langle I \rangle = \frac{\langle P \rangle / 8}{U_{bat}}$$

D'où :

$$D^2 = \frac{<P>}{8} \frac{2 \cdot L}{T_p} \frac{1}{U_{sc} \cdot U_{bat}^2} \cdot (U_{sc} - U_{bat}) \quad (7.12)$$

7.5 Détermination du nombre de canaux

La détermination du nombre de canaux à utiliser pour l'application présentée dans ce chapitre est effectuée par le calcul des ondulations de courant, du rendement et des propriétés taille-poids du convertisseur final.

La première partie du calcul consiste à déterminer la valeur de l'inductance qui est nécessaire en fonction du nombre N_{can} de canaux. Ce calcul est fait en garantissant que chaque branche du convertisseur fonctionne en mode de conduction discontinue dans toute la plage de fonctionnement du convertisseur global.

Pour ce calcul, la puissance maximale transitant dans le convertisseur est de 4800 W, la tension du côté basse tension est de 18 V et le côté haute tension est compris entre 28 et 56 V. Pour le détail des calculs, se référer à l'annexe A. Les valeurs des inductances trouvées pour une fréquence de commutation de 20 kHz sont données dans le tableau 7.1. En fonction de la valeur de l'inductance qui a été trouvée dans chaque cas, il est possible de déterminer la valeur maximale instantanée du courant circulant dans l'inductance. Pour plus de détails sur ce calcul, se référer à l'annexe A. Cette valeur maximale de courant est calculée en prenant en compte tous les cas de fonctionnement du convertisseur, en variant la puissance circulant dans le convertisseur entre 0 et la valeur maximale et en variant la tension du côté haute tension entre ses deux valeurs limites.

Une fois la valeur de l'inductance déterminée, il s'agit de calculer les ondulations maximales de courant dans le convertisseur complet alors que chaque branche fonctionne en mode de conduction discontinue. La figure 7.8 présente les résultats obtenus avec les valeurs données dans le tableau 7.1 en faisant varier la tension du côté haute tension entre ses deux valeurs limites. Dans le cas de fonctionnement où 1 seul canal est utilisé, il est à noter que les ondulations totales de courant sont de 736 Ampères. En fonction de l'ajout de canaux en parallèle, la décroissance des ondulations possède une caractéristique exponentielle.

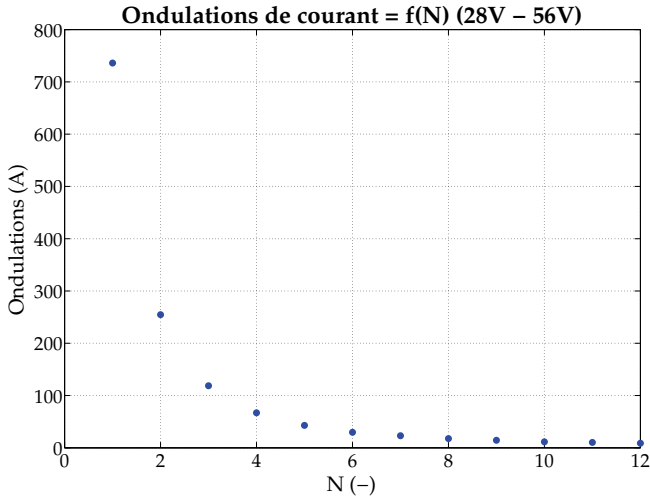


FIG. 7.8 – Ondulations maximales de courant

N_{can}	Inductance	\hat{I}	N_{can}	Inductance	\hat{I}
1	$0.602 \mu H$	736 A	7	$4.22 \mu H$	105 A
2	$1.20 \mu H$	368 A	8	$4.82 \mu H$	92 A
3	$1.81 \mu H$	245 A	9	$5.42 \mu H$	81 A
4	$2.41 \mu H$	184 A	10	$6.02 \mu H$	74 A
5	$3.01 \mu H$	147 A	11	$6.63 \mu H$	67 A
6	$3.62 \mu H$	122 A	12	$7.23 \mu H$	61 A

TAB. 7.1 – Valeur de l'inductance et du courant instantané maximum dans chaque canal en fonction du nombre N_{can} de canaux

Pour l'application liée à la réalisation de ce convertisseur, c'est-à-dire pour interfacer un banc de supercondensateurs à des batteries, une ondulation résiduelle de 25 A est tolérée. Suite aux résultats obtenus, un convertisseur composé au minimum de 7 canaux est suffisant pour atteindre cette contrainte. Avec 7 canaux, les ondulations maximales de courant sont de 23.05 Ampères.

La troisième partie du calcul consiste à déterminer le rendement du convertisseur en fonction du nombre de canaux. Pour ce calcul, le type de transistor choisi est le International Rectifier IRFPS3810. Bien que le courant maximal admissible pour ce composant est de 105 Ampères, les caractéristiques de résistance de passage et de temps de blocage sont gardées pour les cas où le courant est plus élevé. Ceci est fait dans le but d'avoir une même base de comparaison.

Le calcul des pertes dans le convertisseur se décompose en deux parties : les pertes par conduction et les pertes par commutation pour les semiconducteurs de puissance et les pertes par conduction pour les autres éléments. Les pertes par conduction dans les transistors se divisent en 2 parties :

- Lorsque le courant s'accroît, il circule dans le sens passant du transistor. Les pertes par conduction sont donc de $R_{dson} \cdot (I_{TR})^2$. Pour le type de transistor MOS retenu, la résistance de passage R_{dson} est de 13.5 mOhm pour une température de jonction égale à 100°C.
- Lorsque le courant diminue, il circule en sens inverse dans le transistor. Dans ce cas, les pertes par conduction sont identiques au cas où le courant circule dans le sens direct du transistor. La résistance de passage R_{dson} est de 13.5 mOhm pour une température de jonction égale à 100°C.

Les pertes par commutation se décomposent en plusieurs parties pour le convertisseur multicanal :

- Pertes lors du blocage du transistor principal et enclenchement de la diode. Ces pertes sont données par le temps de commutation. Pour le type de transistors retenu, le temps de blocage est de 185 ns. Les pertes se calculent par la formule suivante : $E_{pertes} = 0.5 \cdot T_{off} \cdot U_e \cdot \widehat{I_L}$. U_e correspond à la tension du côté haute tension du convertisseur et $\widehat{I_L}$ correspond au courant lors de l'extinction des transistors.

- Pertes lors du blocage de la diode. Le blocage de la diode se faisant sous un courant nul, ces pertes sont négligées.
- Pertes lors de l'enclenchement du transistor. L'enclenchement du transistor se faisant sous un courant nul, ces pertes sont donc négligées.
- Pertes dans les capacités parasites du transistor MOS. Lors de chaque enclenchement ou blocage d'un transistor MOS, les capacités parasites de ce dernier doivent se charger, respectivement se décharger. Pour chaque transistor (2 par canal), les pertes sont données par la relation : $E_{pertes} = 0.5 \cdot C_{parasite} \cdot (U_e)^2$. Pour le transistor MOS retenu, la capacité parasite est de 5 nF.
- Pertes dans les snubbers. Il est nécessaire d'ajouter un snubber sur chaque transistor MOS dans le but de supprimer les ondulations de tension sur les transistors. Le snubber retenu est de type RC. La capacité retenue est de 3.3 nF. Pour chaque snubber, les pertes sont données par la relation : $E_{pertes} = 2 \cdot 0.5 \cdot C_{snubber} \cdot (U_e)^2$

Les pertes dans les inductances sont calculées en prenant en compte la résistance de passage du cuivre dont est formée l'inductance. Les pertes sont de la forme $R_{ind} \cdot (I_L)^2$. La résistance de passage pour les inductances est donnée dans le tableau 7.2. Les pertes dans les capacités de filtrages sont négligées lors de ce calcul.

Valeur inductance	R_{ind}	Valeur inductance	R_{ind}
0.602 μH	1.6 $m\Omega$	4.22 μH	3.4 $m\Omega$
1.20 μH	1.9 $m\Omega$	4.82 μH	3.7 $m\Omega$
1.81 μH	2.2 $m\Omega$	5.42 μH	4.0 $m\Omega$
2.41 μH	2.5 $m\Omega$	6.02 μH	4.3 $m\Omega$
3.01 μH	2.8 $m\Omega$	6.63 μH	4.6 $m\Omega$
3.62 μH	3.1 $m\Omega$	7.23 μH	4.9 $m\Omega$

TAB. 7.2 – Résistance de passage des inductances retenues

Les résultats pour le calcul du rendement en fonction du nombre de canaux sont donnés dans les figures 7.9 et 7.10. La valeur de la tension du côté basse tension est de 18 Volts alors que celle du côté haute tension est respectivement de 28 et 56 Volts.

A partir de ces graphiques, il est à noter que le rendement est bien plus élevé dans le cas 28 Volts que pour celui de 56 Volts ; la différence

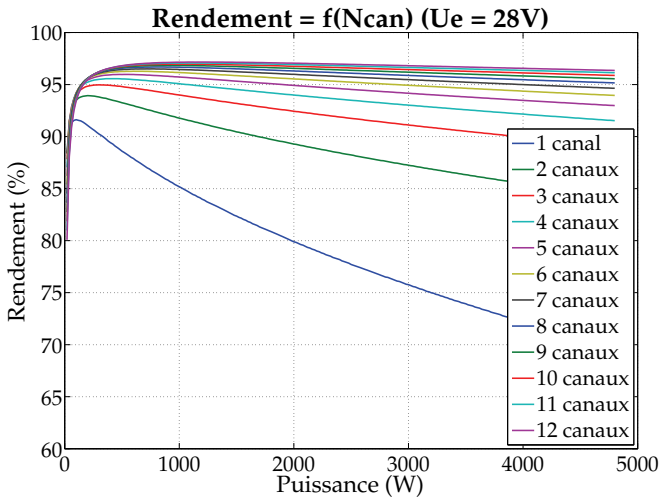


FIG. 7.9 – Rendement = $f(N_{can})$ (Tension côté haute tension $U_e = 28\text{ V}$)

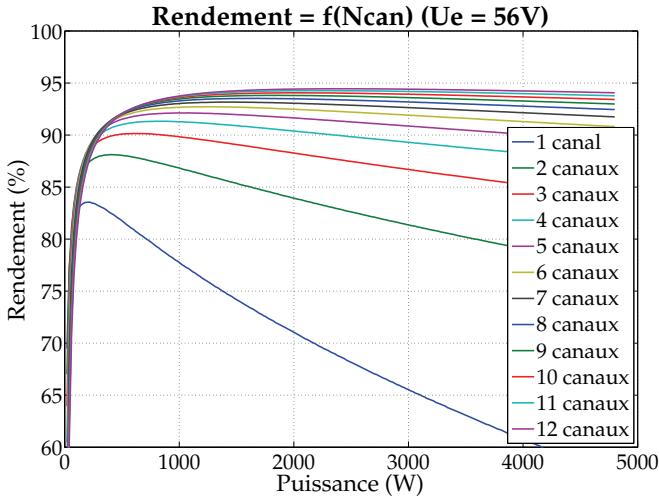


FIG. 7.10 – Rendement = $f(N_{can})$ (Tension côté haute tension $U_e = 56\text{ V}$)

est de 4 %. Ce fait s'explique par les plus grandes pertes par commutation dans le cas 56 Volts, notamment pour les pertes dues à la charge et à la décharge de toutes les capacités parasites et pour les pertes lors du blocage du transistor - enclenchement de la diode. De plus, les valeurs instantanées du courant sont plus importantes dans le cas 56 Volts que dans le cas 28 Volts alors que la puissance traversant le convertisseur est identique, d'où des pertes par conduction plus importantes. Les figures 7.11 et 7.12 présentent le courant dans chaque canal pour une tension de 28 et 56 Volts (côté haute tension) pour un convertisseur composé de 12 canaux. Avec une tension de 56 Volts, la valeur de crête du courant dans chaque canal est de 44.4 Ampères. Dans le second cas, pour une tension de 56 Volts, la valeur maximale instantanée du courant est de 61.3 Ampères.

Le calcul du rendement présenté ci-dessus ne prend pas en compte les pertes magnétiques dans les inductances ainsi que les pertes dues aux connexions entre les composants. Il s'agit notamment des pertes dans les câbles, le pistes du circuit imprimé et les soudures qui sont négligées.

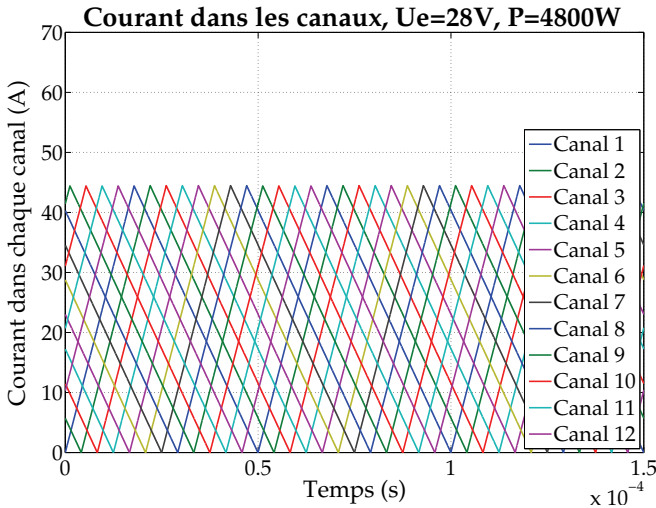


FIG. 7.11 – Courant dans chaque canal pour $P = 4\,800\text{ W}$,
 $N_{can} = 12\text{ canaux}$; $U_e = 28\text{ V}$

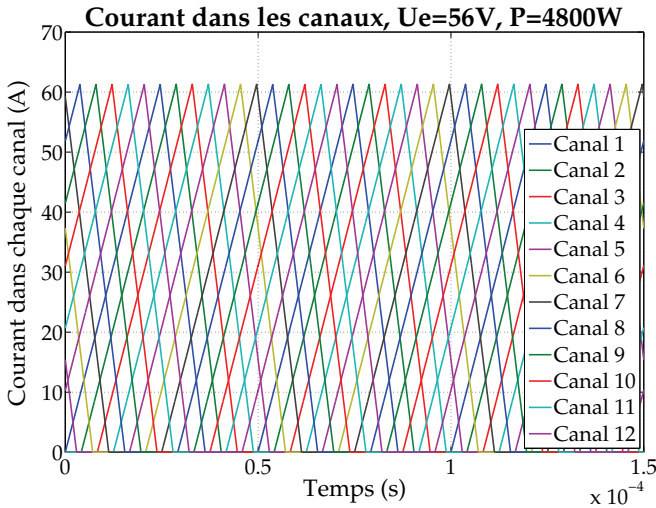


FIG. 7.12 – Courant dans chaque canal pour $P = 4\,800\text{ W}$,
 $N_{can} = 12$ canaux ; $U_e = 56\text{ V}$

Pour le calcul des pertes de connexion entre les composants, il s'agit de diminuer au maximum les distances entre les composants. Ainsi, plus le convertisseur comportera de canaux, plus les pertes de connexion seront importantes.

Pour déterminer le poids et le volume du convertisseur total, l'élément le plus important concerne les inductances de lissage. En effet, les transistors sont de type Super-247, pesant chacun moins de 10 grammes. Les paramètres influençant la taille de l'inductance sont sa valeur et son courant maximal. En fonction du nombre de canaux, le courant maximal circulant dans chaque inductance est donné dans le tableau 7.1 pour un nombre de canaux compris entre 1 et 12.

Il a été montré précédemment que le nombre de canaux doit être au minimum de 7 pour garantir une ondulation résiduelle de courant suffisamment faible pour l'application retenue. Avec les considérations faites dans le paragraphe précédent, la taille des inductances nécessaire pour une réalisation 8 canaux ou 12 canaux est du même ordre de grandeur. Pour des questions pratiques de réalisation, le nombre de canaux retenu

pour la réalisation de ce convertisseur est de 8.

7.6 Résultats des simulations

La suite de l'étude du fonctionnement d'un convertisseur multicanal consiste à effectuer des simulations pour vérifier les concepts introduits dans les sections précédentes.

Dans les graphiques qui vont suivre dans ce chapitre, les résultats des simulations sont présentés pour les cas suivants : la tension du côté basse tension est fixée à 18 Volts ; la tension du côté haute tension est fixée à 28, respectivement 56 Volts ; la puissance circulant dans le convertisseur est maximale (4800 Watts) ; la fréquence de commutation pour chaque canal est de 20 kHz et le convertisseur est composé de 8 canaux. Les simulations effectuées avec la tension côté haute tension la plus haute correspondent au cas où la valeur instantanée des pointes de courant dans chaque canal est la plus importante, mais ne correspond pas au cas où les ondulations de courant dans le convertisseur global sont les plus importantes.

Les figures 7.13 et 7.14 représentent le courant dans chaque canal pour les deux cas de tension côté haute tension retenus. Il est à noter que dans le cas où la tension est la plus faible (28 Volts), le régime de conduction est critique, c'est-à-dire que le courant s'annule lors de chaque période de commutation, mais le temps où il est à zéro est nul. Les pointes de courant dans chaque canal sont de 65 Ampères lorsque la tension du côté haute tension est de 28 Volts. Dans le cas où la tension est la plus élevée, 56 Volts dans ce cas, la valeur des pics de courant dans chaque canal est de 90 Ampères ; le régime de conduction est de type discontinu. Dans cette figure, il faut également noter que le déphasage entre chaque canal est de 45° , ce qui correspond à 360° divisé par le nombre N_{can} de canaux.

Les figures 7.15 et 7.16 représentent le courant total du côté basse tension pour le convertisseur complet. Ce courant correspond à la somme du courant de tous les canaux tels que représentés dans les figures 7.13 et 7.14. Pour le premier cas (28 Volts), les ondulations de courant sont de 4.5 Ampères ; pour le deuxième cas, les ondulations de courant sont de 5.5 Ampères. La fréquence résultant des ondulations totales de courant est de 160 kHz, ce qui correspond à la multiplication de la fréquence

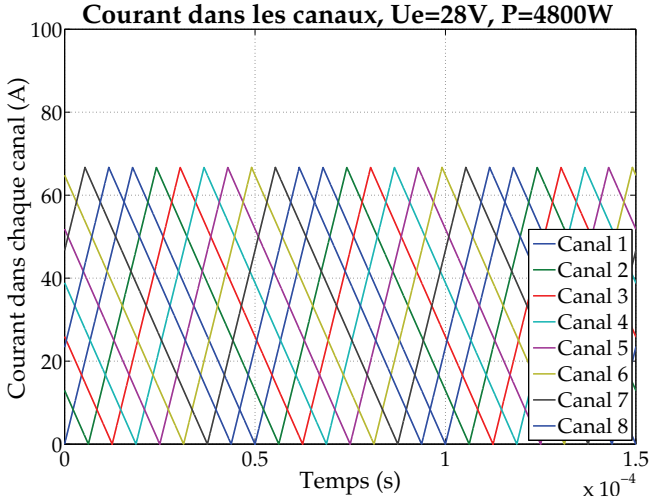


FIG. 7.13 – Courant dans chaque canal pour $P = 4\,800\text{ W}$;
 $N_{can} = 8$ canaux ; $U_e = 28\text{ V}$

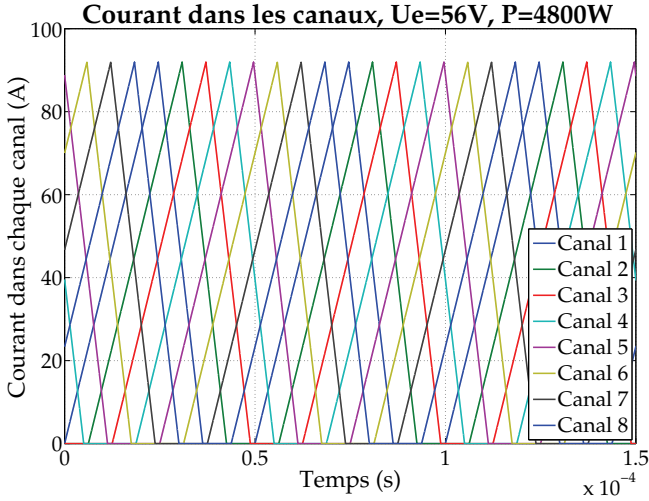


FIG. 7.14 – Courant dans chaque canal pour $P = 4\,800\text{ W}$;
 $N_{can} = 8$ canaux ; $U_e = 56\text{ V}$

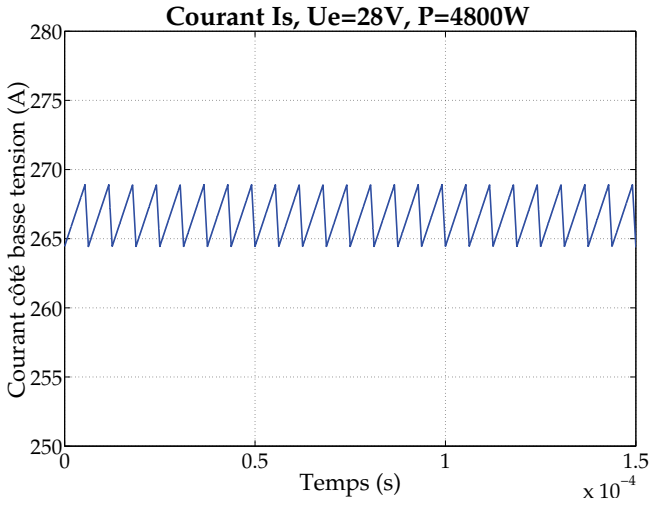


FIG. 7.15 – Courant du côté basse tension pour $P = 4\,800\text{ W}$; $N_{can} = 8$ canaux ; $U_e = 28\text{ V}$

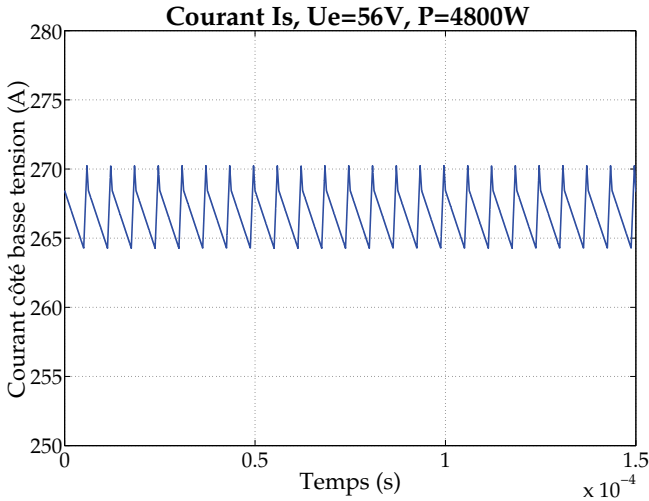


FIG. 7.16 – Courant du côté basse tension pour $P = 4\,800\text{ W}$; $N_{can} = 8$ canaux ; $U_e = 56\text{ V}$

élémentaire de chaque canal par le nombre N_{can} de canaux.

Les figures 7.17 et 7.18 représentent le courant total du convertisseur du côté haute tension. Dans le premier cas (28 Volts), les ondulations de courant sont de 65 Ampères alors qu'elles sont de 90 Ampères dans le second cas (56 Volts).

La figure 7.19 représente les ondulations de courant pour le convertisseur total en fonction du rapport cyclique. La courbe des ondulations est donnée pour différentes valeurs de tension pour le côté haute tension. La plage de rapport cyclique qui est représentée correspond à la variation de 0 à 4800 Watts (puissance maximale) pour le convertisseur complet. Les formes d'ondes obtenues sont discontinues et correspondent à l'addition de signaux triangulaires décalés dans le temps. Le calcul de ces ondulations totales est effectué par simulations successives pour tous les cas de fonctionnement.

La structure de réglage est définie dans le paragraphe 7.4 avec une séparation du réglage pour le cas de fonctionnement "buck" et "boost". Le régulateur implémenté est de type à priori avec une correction de

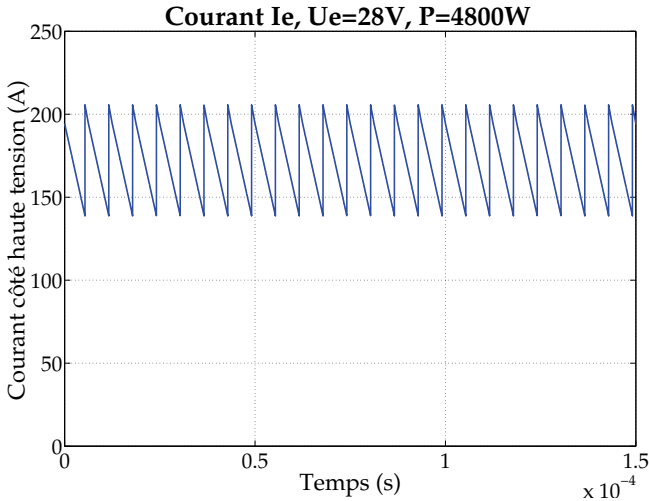


FIG. 7.17 – Courant du côté haute tension pour
 $P = 4\,800\text{ W}$; $N_{can} = 8$ canaux ; $U_e = 28\text{ V}$

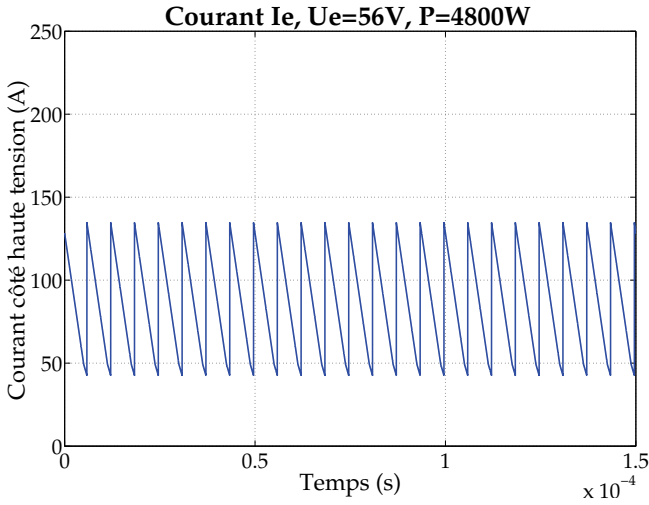


FIG. 7.18 – Courant du côté haute tension pour $P = 4\,800\text{ W}$; $N_{can} = 8$ canaux; $U_e = 56\text{ V}$

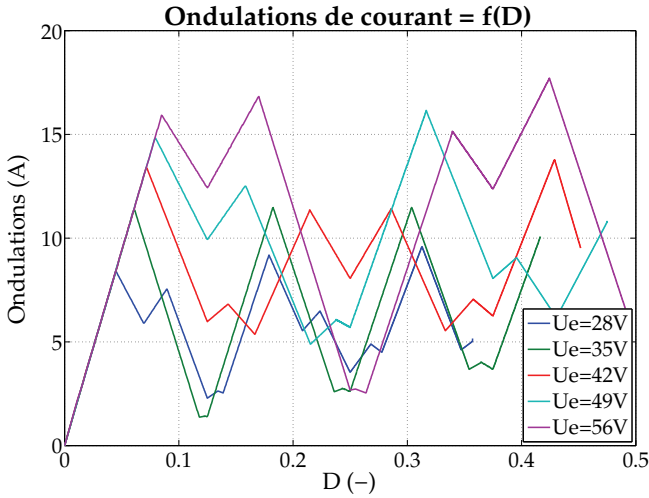


FIG. 7.19 – Ondulations totales de courant en fonction du rapport cyclique pour différentes valeurs de tension U_e

type proportionnel-intégral monté en parallèle. Les figures 7.20 et 7.21 représentent la réponse du régulateur à des sauts de consigne sur la puissance qui transite dans le convertisseur. Une puissance négative correspond à un fonctionnement de type “boost”. Au temps $t = 0$ s, la puissance de consigne est -200 W ; à $t = 40 \mu\text{s}$, la consigne passe à -4800 Watts ; à $t = 190 \mu\text{s}$, la consigne est de -0 Watts et finalement à $t = 240 \mu\text{s}$, la consigne passe à +4800 Watts. La réponse du système à ces sauts de consigne est très rapide et atteint une valeur très proche de la consigne en une période de commutation, puis atteint la valeur précise de la commande en 3 périodes de commutation. Cette rapidité est valable pour le mode de fonctionnement “boost” et également pour le mode de fonctionnement “buck”. En comparaison avec un convertisseur de type standard fonctionnant en régime de conduction continue, il n’est pas possible d’obtenir une réponse aussi rapide à un saut de consigne à cause de l’inertie due à l’inductance de forte valeur. Cette inertie n’a pas d’influence dans le cas du convertisseur multicanal fonctionnant en régime de conduction discontinu comme il est possible de le voir dans

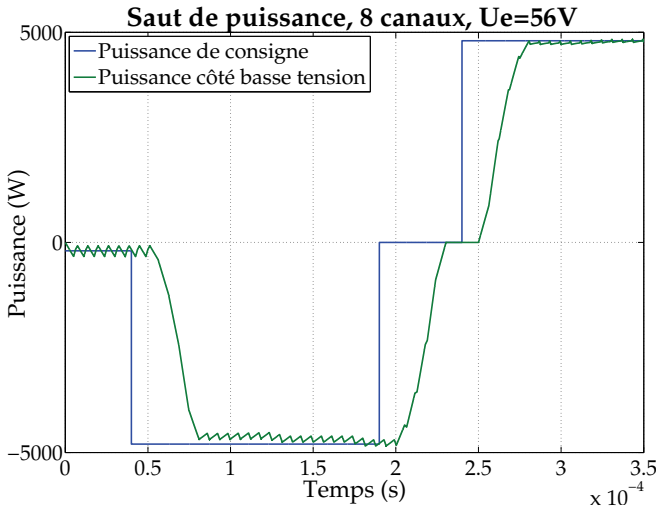


FIG. 7.20 – Réponse du convertisseur à des sauts de consigne de puissance

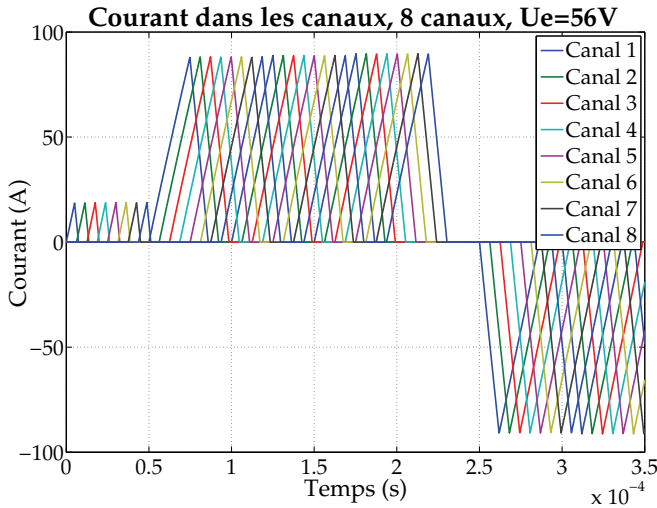


FIG. 7.21 – Réponse du convertisseur à des sauts de consigne de puissance (réponse en courant)

la figure 7.21.

7.7 Résultats expérimentaux

Un montage du convertisseur multicanal tel qu'il a été présenté dans les paragraphes précédents est réalisé. La figure 7.22 représente une photo de ce convertisseur. Sur la platine, les inductances sont représentées en orange et se situent directement derrière les radiateurs. Les transistors MOS sont représentés en noir, sur la face visible des radiateurs. Il faut noter que la taille des inductances est suffisamment faible, comparable en taille aux transistors MOS, pour qu'elles puissent être directement intégrées dans la partie de puissance. Le dessous de la platine (non visible sur cette photo) est composée de toute la partie de filtrage et des snubbers qui sont nécessaires pour amortir les ondulations de tensions lorsque le courant est nul dans les inductances.

Les caractéristiques des composants principaux sont les suivants :

Transistor MOS Modèle IRFPS3810 de International Rectifier

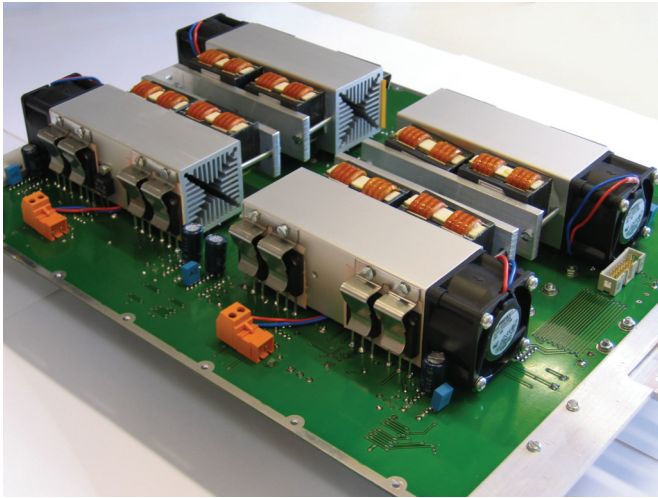


FIG. 7.22 – Photo du convertisseur multicanal réalisé

Inductance Fabriquée sur mesure pour le convertisseur par Payton Group, chaque inductance est de $7.0 \mu\text{H}$ (65 A), maximum $5 \text{ m}\Omega$ de résistance de passage

Snubber Les snubbers utilisés sont de type RC connectés entre le drain et la source des transistors.

Dans le cas où le convertisseur serait fabriqué selon une topologie manière standard, la valeur de l'inductance nécessaire serait de $50 \mu\text{H}$ (255 A) pour avoir les mêmes caractéristiques. Dans ce cas, le poids et le volume du convertisseur final seraient bien plus élevés que pour le cas d'un convertisseur multicanal.

Les signaux PWM, la régulation ainsi que tous les dispositifs de sécurité ont été réalisés sur deux cartes distinctes. La première consiste en une carte DSP spécialement développée pour toutes les applications d'électronique de puissance. Cette carte est principalement composée d'un DSP de type Sharc, d'une FPGA de type Xilinx, des convertisseurs A/D et D/A. La seconde carte est une carte d'adaptation entre la carte Sharc et la carte de puissance. La deuxième carte est également utilisée pour implémenter la gestion de la conduction inverse des transistors

MOS, des protections (notamment en cas de courant trop important) et de la mise en forme de toutes les mesures utiles pour la régulation.

Dans le montage proposé, la gestion de la conduction inverse est réalisée à l'aide de composants logiques discrets. Le courant dans chaque canal est mesuré par des capteurs à effet hall. Il est ensuite comparé avec une référence de courant minimale pour l'extinction des transistors avant que le courant dans le canal ne s'annule ; les diodes intrinsèques des transistors MOS sont alors utilisées pour la fin de la décroissance du courant. La référence de la valeur du courant pour le blocage du transistor est générée à travers le DSP et est une fonction du type de transistor et des tensions de chaque côté du convertisseur.

Pour les tests, le côté basse tension du convertisseur a été connecté à un banc de batteries (3 x 6 V connectés en série) et le côté haute tension a été connecté à un banc de supercondensateurs de 150 Farads, 56 V maximum. La tension minimale admissible sur le banc de supercondensateurs est fixée à la moitié de la tension maximale, dans ce cas 28 Volts. Le taux de décharge de 0.5 correspond à un standard pour les supercondensateurs et est principalement déterminé par la durée de vie de ce type de composant. De plus, bien que seulement 50 % de la plage de tension est utilisée, 75 % du potentiel énergétique des supercondensateurs est exploité.

Les figures 7.23 et 7.24 représentent les mesures faites sur le premier canal quand le convertisseur fonctionne en mode 4 canaux, en mode "boost" et avec une puissance de 2400 Watts, soit la moitié de la puissance maximale du convertisseur. La tension du côté haute tension est de 30 Volts. Comme seulement la moitié des canaux est utilisée, les contraintes sur chaque canal mesuré correspondent aux contraintes maximales. Dans ces mesures, il est possible de voir que le courant est bien de type discontinu : il s'annule à la fin de chaque période de commutation. Sur la figure 7.24, les tensions de commande des deux transistors d'un canal (tension grille-source) sont représentées. Cette figure présente le fonctionnement du transistor 2 pour la commande de la conduction inverse lors de la décroissance du courant. Il est possible de voir que l'enclenchement de cette commande se fait après le déclenchement du transistor 1, avec le temps nécessaire d'antiveauement. Le déclenchement de ce dernier se fait avant que le courant le traversant s'annule, pour prendre en compte les temps de propagation des signaux et le temps de blocage du transistor MOS.

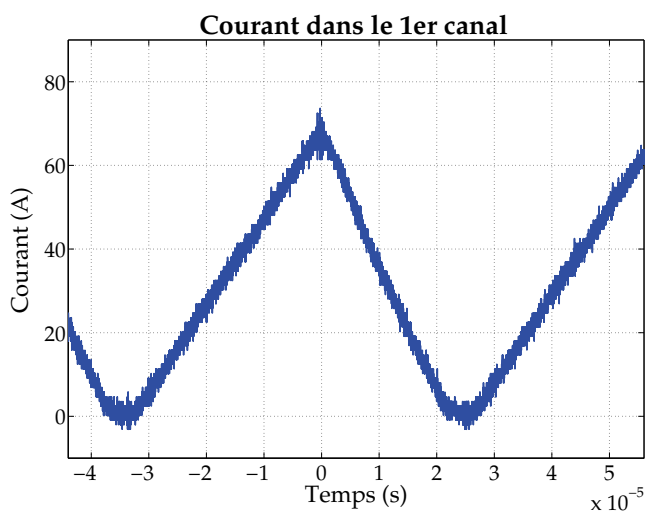


FIG. 7.23 – Mesures du courant pour le 1er canal ; $N_{can} = 4$;
 $U_e = 30\text{V}$; $P = 2400\text{W}$

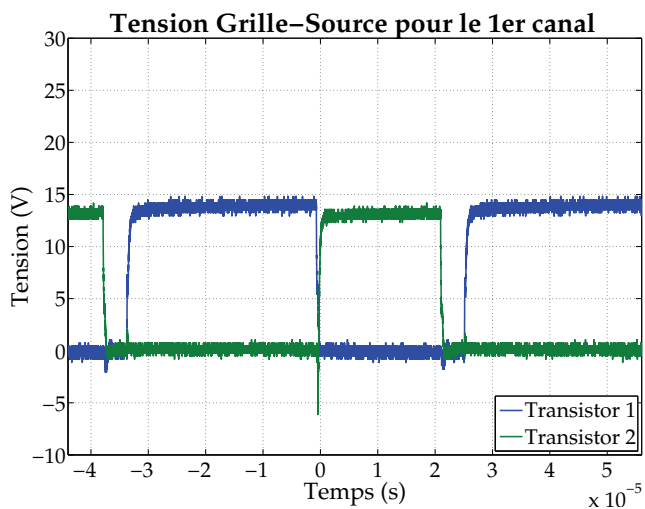


FIG. 7.24 – Mesures des tensions Grille-Source des transistors
 MOS pour le 1er canal ; $N_{can} = 4$; $U_e = 30\text{V}$; $P = 2400\text{W}$

Les figures 7.25 et 7.26 représentent les mesures faites du courant de chaque canal quand le convertisseur se trouve dans le même cas de fonctionnement que dans le paragraphe précédent. La tension du côté haute tension est également de 30 Volts. Il est possible de voir dans cette figure que chaque canal est bien déphasé de 90° et que chaque canal fonctionne en mode de conduction discontinue. La pointe de courant dans chaque canal est d'environ 70 Ampères. La différence entre chaque canal est due à la non symétrie parfaite de la géométrie de chaque canal et aux tolérances sur les différents éléments (notamment l'inductance). Le fonctionnement global du convertisseur n'est pas modifié par ces dissymétries, tant que chaque canal fonctionne individuellement en mode de conduction discontinue. Ainsi, rien n'est effectué sur la commande pour symétriser tous les canaux entre eux.

La figure 7.26 représente le courant total du côté basse tension quand le convertisseur fonctionne dans le même régime que ci-dessus. La valeur moyenne du courant est de 137 Ampères et les ondulations sont de 20 Ampères. Dans le cas théorique, la valeur moyenne du courant côté

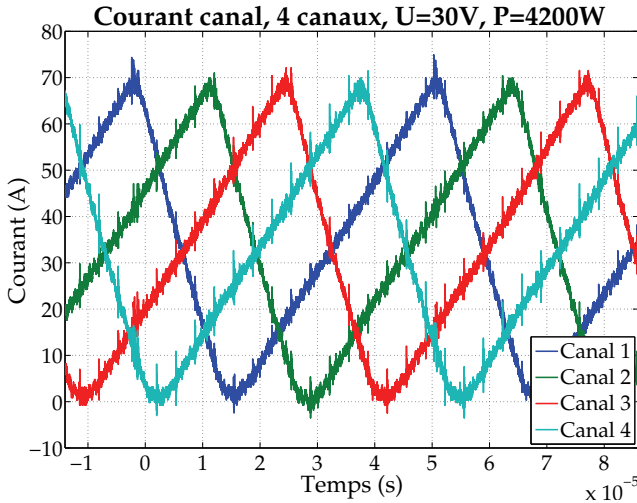


FIG. 7.25 – Mesures du courant dans les canaux ; $N_{can} = 4$ canaux ; $U_e = 30V$; $P = 2400W$

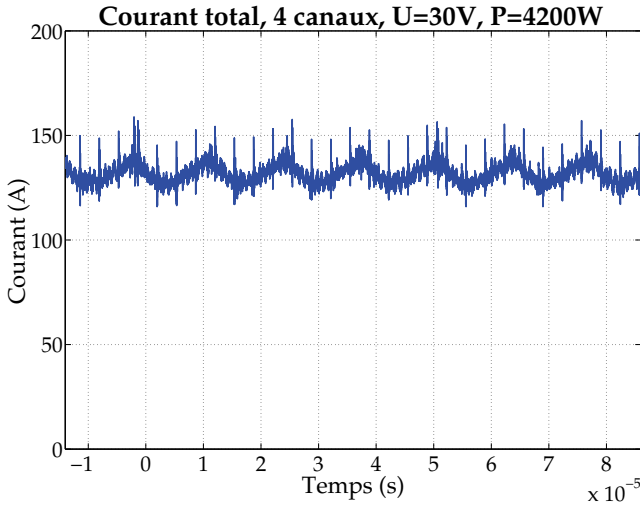


FIG. 7.26 – Mesures du courant total côté basse tension ;
 $N_{can} = 4$ canaux ; $U_e = 30V$; $P = 2400W$

basse tension est de :

$$< I_{bat} > = \frac{P_{con}}{U_{bat}} = \frac{2400W}{18V} = 133A \quad (7.13)$$

La mesure donne un courant un peu plus élevé car la tension aux bornes de la batterie baisse lorsque qu'elle délivre du courant à cause de sa résistance interne. Ainsi, le courant mesuré est plus élevé de 4 Am-pères. Pour la mesure des oscillations, elles sont plus faibles lorsque le convertisseur fonctionne avec tous les canaux (pour le cas où la puissance est aussi maximale) que quand il fonctionne avec 4 canaux comme présenté ici.

La figure 7.27 représente le rendement mesuré du convertisseur complet lorsqu'il fonctionne en mode 4 canaux et que la tension du côté haute tension est de 35 Volts. Le rendement maximal est de 96.3 % et le rendement est toujours supérieur à 90 % dans toute la plage de fonctionnement du convertisseur (sauf pour de très petites valeurs de puissance). La mesure du rendement donnée dans cette figure est représentative du rendement lorsque le convertisseur fonctionne avec ses

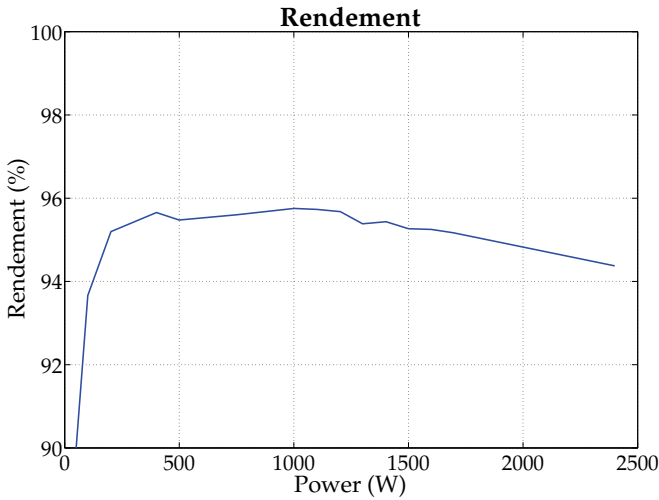


FIG. 7.27 – Rendement mesuré pour un fonctionnement en 4 canaux, $U_e = 35V$

8 canaux. Dans ce cas, il s'agit de multiplier l'axe des x par un facteur 2. Ceci peut être fait car chaque canal fonctionne alors dans le même cas de fonctionnement que pour le cas 4 canaux.

A très basse puissance, le rendement est faible car les pertes par commutations deviennent du même ordre de grandeur que la puissance qui traverse le convertisseur. A puissance élevée, le rendement baisse car les pertes par conduction deviennent prépondérantes. Ce phénomène n'a pas été mis en évidence lors du calcul des pertes faites au début du chapitre, qui sont non seulement dues aux pertes dans les composants de puissance, mais également dans les pistes du circuit imprimé, dans les soudures et dans toutes les connexions. Par exemple, une résistance parasite de $1\text{ m}\Omega$ représente une dissipation (et donc une perte) de 62.5 Watts. Une étude complète a été réalisée sur la platine expérimentale pour trouver toutes les résistances parasites et des solutions pour les supprimer ou les diminuer. La mesure donnée correspond à celle obtenue après cette recherche et les modifications nécessaires.

Une solution pour augmenter le rendement lorsqu'une faible puis-

sance circule dans le convertisseur est de désactiver certains canaux lorsque le convertisseur fonctionne à basse puissance. Ce principe a été développé dans [88]. Dans ce cas, les pertes par commutation dans le convertisseur global sont diminuées car le nombre de transistors qui doivent commuter lors de chaque période de commutation est réduit.

Par rapport à d'autres types de convertisseurs qu'il est possible de trouver sur le marché, le convertisseur proposé a un rendement très élevé pour une application à faible voltage (18 Volts) et haut courant (250 Ampères).

7.8 Conclusion

Ce chapitre présente l'étude d'un type de convertisseur approprié pour une application mobile pour interfacer un banc de supercondensateurs au reste du système de traction. A cause de la technique de fabrication, la tension maximale admissible aux bornes d'un banc de supercondensateurs est faible (2.7 Volts pour chaque élément). Il est possible de connecter plusieurs supercondensateurs en série pour augmenter la tension résultante, mais des éléments symétriseurs pour garantir que la tension aux bornes de chaque élément est la même doivent être utilisés. Dans beaucoup d'applications mobiles, la tension du banc de supercondensateurs reste faible et donc le courant qui circule dans le convertisseur est élevé.

Pour une application mobile, les critères les plus importants lors du choix d'un convertisseur sont le rendement, le poids et le volume. Le type de convertisseur présenté dans ce chapitre réunit toutes ces caractéristiques. Il est de type multicanal entrelacé. Les principales caractéristiques sont les suivantes :

- Utilisation de plusieurs convertisseurs DC/DC de type standard en parallèle
- Tous les canaux fonctionnent de manière déphasée dans le temps
- Chaque convertisseur élémentaire fonctionne en régime discontinu
- Utilisation des propriétés de la conduction inverse des transistors MOS

Le dimensionnement, notamment le choix du nombre de canaux et de la taille des inductances, a été fait pour un cas particulier, l'interfaçage d'un banc de supercondensateurs à des batteries. Les principales caractéristiques

téristiques de ce convertisseur sont les suivantes : puissance maximale 4800 Watts, tension côté basse tension 18 Volts, tension côté haute tension 28-56 Volts et courant maximal 266 Ampères. Dans le convertisseur proposé, les inductances nécessaires sont de $7\text{ }\mu\text{H}$. Pour un convertisseur de type standard, une inductance de $50\text{ }\mu\text{H}$ doit être utilisée pour avoir les mêmes caractéristiques sur les ondulations de courant. Le gain sur le poids et le volume est donc très important lors de l'utilisation d'un convertisseur multicanal.

Une première phase de simulation est réalisée et présente les formes des courants dans le convertisseur ainsi qu'un calcul du rendement théorique du convertisseur. Une platine expérimentale du convertisseur est ensuite réalisée et un rendement maximal de 96.3 % est mesuré. Ce rendement est très grand par comparaison avec d'autres types de convertisseurs pour le cas d'une application à basse tension et haut courant tel qu'il est souvent rencontré pour des applications d'assistance en puissance à base de supercondensateurs.

Chapitre 8

Conclusion générale

Le sujet principal de cette thèse concerne le domaine des transports, plus particulièrement la problématique liée aux véhicules. Le but est d'étudier les différentes solutions pour augmenter leur rendement énergétique et pour diminuer leurs rejets polluants dus aux moteurs à combustion.

La stratégie suivie dans ce travail ne consiste pas à remplacer le type de la source d'énergie primaire des véhicules, mais de l'exploiter de manière plus efficace. La voie retenue consiste à ajouter un système de stockage d'énergie embarqué dans le but de récupérer l'énergie de freinage et d'exploiter le moteur lié à la source d'énergie primaire de manière optimale. Ce concept peut également être appliqué à des véhicules utilisant d'autres sources d'énergie primaire. Ainsi, trois types de véhicules différents sont étudiés en détail.

8.1 Résumé

La première partie de cette thèse a consisté à répertorier les différentes sources d'énergie qui peuvent être utilisées dans le domaine des transports, dans le but de réduire les impacts sur l'environnement dus à la combustion des moteurs thermiques standards.

La suite de cette thèse fait l'étude des systèmes permettant d'augmenter le rendement énergétique des véhicules tout en conservant les mêmes propriétés dynamiques que les véhicules actuellement en circulation. La solution étudiée, qui présente un fort potentiel à court terme, concerne l'ajout d'un système d'assistance en puissance où un stockeur d'énergie additionnel est embarqué dans le véhicule. La suite de ce travail consiste à caractériser ce système d'assistance en puissance, à dimensionner de manière optimale le stockeur d'énergie additionnel et à définir le gain sur le rendement énergétique en fonction des paramètres du véhicule et des spécificités du parcours.

Ainsi, un véhicule ayant un système d'assistance en puissance possède deux sources d'énergie embarquées et fait partie de la catégorie des véhicules hybrides, selon la définition retenue dans ce travail, car la puissance de traction est fournie conjointement par les deux sources. La stratégie retenue consiste à utiliser le stockeur d'énergie pour couvrir les contraintes élevées en puissance des moteurs de traction et à exploiter la première source d'énergie pour fournir la puissance moyenne pour le parcours. Un "downsizing" du moteur associé à la première source d'énergie peut être effectué car il n'est plus dimensionné pour fournir les contraintes élevées en puissance des moteurs de traction.

L'ajout d'un système de stockage embarqué dans un véhicule permet de récupérer de manière optimale l'énergie de freinage et de la réinjecter dans la chaîne de traction lors des accélérations qui suivent. Dans un véhicule standard et sans prendre en compte le rendement de la chaîne de traction et du stockeur d'énergie, jusqu'à 78 % de l'énergie fournie par la première source d'énergie est dissipée lors des freinages. Les différentes topologies pour l'ajout d'un stockeur d'énergie ont été décrites dans le chapitre 2 et sont identiques à celles qui se retrouvent pour les véhicules hybrides : série, parallèle et série-parallèle.

Le chapitre 2 présente une méthode optimale de dimensionnement du stockeur d'énergie en fonction du type de véhicule et du parcours. La méthode de calcul se base sur un parcours caractérisé par trois phases

distinctes : une accélération, un parcours à vitesse constante et un freinage. Les paramètres qui ont été étudiés pour ce calcul sont : masse à vide, accélération, vitesse maximale, longueur du parcours, déclivité et forces de frottements. Suite à ce calcul, un système d'assistance en puissance ne permet pas de diminuer de manière significative la consommation énergétique d'un véhicule lorsque le temps nécessaire pour l'accélération est faible par rapport au temps complet du parcours. Le plus grand potentiel pour diminuer la consommation énergétique d'un véhicule (supérieur à 80 %) est trouvé lorsque la durée du parcours est faible, c'est-à-dire lorsque la phase du parcours à vitesse constante est courte.

Le chapitre 3 présente les différents types de stockeurs d'énergie pouvant être embarqués dans un véhicule pour le système d'assistance en puissance. Le type retenu dans ce travail est le supercondensateur à cause de sa durée de vie importante et de sa densité en puissance élevée.

Les trois chapitres suivants de cette thèse présentent trois cas d'application où un système d'assistance en puissance est embarqué dans un véhicule. Les cas étudiés sont les suivants :

- Un réseau de véhicules (trams) alimentés par caténaire
- Une automotrice articulée diesel-électrique
- Un véhicule électrique léger de type scooter

Pour ces trois exemples d'application, la topologie pour l'ajout d'un système de stockage d'énergie embarqué a été étudiée, une méthode de dimensionnement du stockeur d'énergie a été présentée et la réduction de la consommation énergétique du véhicule a été déterminée.

Dans les différents types de véhicule présentés, un système d'assistance en puissance embarqué implique l'ajout d'un convertisseur statique entre le stockeur d'énergie et le reste des composants de propulsion. Ce convertisseur est utilisé pour gérer les flux de puissance entre les différentes sources d'énergie et le moteur de traction et pour adapter le niveau de tension du stockeur d'énergie aux autres composants de propulsion du véhicule. Le dernier chapitre de cette thèse étudie un convertisseur spécialement bien adapté pour une application mobile où les critères de poids, de volume et de rendement sont déterminants. Ce convertisseur est de type continu-continu multicanaux entrelacés fonctionnant en régime de conduction discontinue. Une réalisation pratique de la topologie retenue a été réalisée pour valider les concepts théoriques.

8.2 Résultats

Lors des calculs effectués pour des véhicules et des parcours généraux, il a été montré qu'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué ne permet pas dans tous les cas de réduire notablement la consommation énergétique d'un véhicule. Cette réduction est potentiellement importante dans le cas où la distance à parcourir entre deux arrêts est faible.

Le premier cas d'exemple étudié dans cette thèse concerne un véhicule alimenté par caténaire. Dans le chapitre 4, l'étude pour ce cas ne s'est pas concentrée seulement au niveau du véhicule, mais sur le réseau de transport complet : sous-stations - caténaires - véhicules. Ainsi, un logiciel de simulation est développé pour ce type de réseau de transport et modélise les interactions entre les différents véhicules et les sous-stations pour déterminer la quantité d'énergie de freinage qui est réinjectée par chaque véhicule. Dans le cas retenu, les véhicules avec un stockeur d'énergie sont exploités de manière identique aux véhicules sans stockeur d'énergie et, ainsi, la puissance de freinage qui est réinjectée dans la caténaire est similaire. Le stockeur d'énergie est utilisé seulement pour récupérer la puissance de freinage qui n'est pas réinjectée dans la caténaire. Sans modification concernant l'infrastructure fixe du réseau, un système d'assistance en puissance permet de diminuer la consommation énergétique du système complet de 18 % lorsqu'un seul véhicule est sur la ligne et de 8 % lorsque les véhicules se suivent avec 5 minutes d'intervalle. Les résultats obtenus pour ce cas d'exemple ne peuvent néanmoins pas être généralisés à tous les réseaux de transports à caténaire à cause de la multitude de paramètres influençant la baisse de la consommation énergétique lors de l'ajout d'un stockeur d'énergie embarqué. Toutefois, le simulateur développé permet d'étudier et de déterminer la baisse de la consommation énergétique pour chaque cas d'application en fonction des caractéristiques propres de chaque réseau de transport alimenté par caténaire. Pour le réseau retenu comme exemple, une réduction de la résistance de ligne par un facteur 4 sans exploiter des véhicules avec un stockeur d'énergie, la réduction de la consommation du système complet est de 7.5 % pour le cas où les véhicules se suivent à intervalles de 5 minutes. Un autre paramètre influençant de manière importante la consommation énergétique du réseau de transport est la puissance des auxiliaires. Ainsi, une réduction de 5 kW de

la puissance des auxiliaires de chaque véhicule permet de réduire de 4 % la consommation du réseau total pour des véhicules sans stockeur d'énergie et de 5 % pour des véhicules avec un stockeur d'énergie embarqué. En plus de la réduction de la consommation énergétique du système, la valeur ajoutée lors de l'utilisation d'un système d'assistance en puissance n'est pas négligeable dans ce cas. Ainsi, le véhicule peut parcourir de faibles distances sans caténaires, un nombre plus important de véhicules peuvent simultanément circuler sur la ligne ou les propriétés dynamiques des véhicules peuvent être augmentées sans modifier les contraintes sur le réseau de distribution d'énergie.

Le second exemple d'application est étudié dans le chapitre 5 et concerne un véhicule de type diesel-électrique. Dans ce cas, le parcours retenu se situe en région montagneuse, présente de fortes contraintes dues à la déclivité et est caractérisé par de nombreuses phases d'arrêt. Contrairement aux autres cas présentés dans cette thèse, la puissance fournie par le premier moteur, un moteur diesel dans ce cas, n'est pas lissé sur une phase accélération-freinage, mais sur le parcours complet incluant la montée et la descente du véhicule. Ainsi, l'énergie qui est récupérée lors de la descente est réinjectée dans le système de traction lors de la montée suivante. Du fait de la taille importante du stockeur qui doit être utilisé pour effectuer un dimensionnement optimal sur le parcours complet, une recherche du meilleur compromis entre le volume, le poids et le coût du stockeur est réalisée. Une méthode de "down-sizing" du moteur diesel est développée et montre qu'un stockeur de faible dimension permet de diminuer la taille du moteur diesel d'un facteur important. Le type de véhicule retenu comme exemple d'application dans ce chapitre correspond à une automotrice articulée, mais les mêmes méthodes et concepts peuvent être appliqués à n'importe quel autre type de véhicules diesel-électrique. Un logiciel de simulation pour le dimensionnement du stockeur d'énergie et pour déterminer la réduction de la consommation énergétique du véhicule est spécialement développé. Dans le cas d'application retenu, le meilleur compromis est trouvé lorsque la taille du moteur diesel est divisée par un facteur deux, 380 kW au lieu de 760 kW, et que le stockeur d'énergie additionnel est composé de 11 500 supercondensateurs de 3000 F. La diminution de la consommation, en prenant en compte le rendement charge-décharge du stockeur d'énergie et sans tenir compte du rendement de la chaîne de traction pour l'exploitation de l'énergie de freinage, est de 47 % et

l'investissement supplémentaire lié à l'ajout du système d'assistance en puissance est rentable après une durée d'exploitation de 11 ans.

La dernière application, présentée dans le chapitre 6, concerne un véhicule électrique léger dont la source d'énergie principale est composée de batteries. Le système d'assistance en puissance proposé dans ce cas permet d'augmenter la durée de vie des batteries par diminution des contraintes en puissance et d'augmenter le rendement énergétique du véhicule par récupération optimale de l'énergie de freinage. Le véhicule retenu lors de cette étude est un scooter électrique, mais les mêmes principes et les mêmes méthodes de dimensionnement peuvent être appliqués à tout autre véhicule utilisant des batteries comme source d'énergie principale. Dans ce cas, la solution proposée consiste à remplacer les batteries Nickel-Cadmium d'origine par une batterie Lithium-Polymère et un banc de supercondensateurs de 29 éléments de 2600 Farrads. Le poids total du scooter avec le stockeur d'énergie est 1.2 kg plus léger que le système d'origine et est donc compatible avec ce type de véhicule à cause du changement de type de batterie utilisé.

Dans tous les exemples d'application présentés, un convertisseur statique doit être utilisé pour interfacer le stockeur d'énergie avec les autres composants de traction. Pour une application mobile, les critères les plus importants pour ce convertisseur sont le rendement, le poids et le volume. Le convertisseur multicanal entrelacé étudié dans le chapitre 7 réunit toutes ces caractéristiques et ses principales propriétés sont :

- Utilisation de plusieurs convertisseurs DC/DC de type standard en parallèle
- Tous les canaux fonctionnent de manière déphasée dans le temps
- Chaque convertisseur élémentaire fonctionne en régime discontinu
- Utilisation de la conduction inverse des transistors MOS

Un convertisseur de ce type utilisant 8 canaux en parallèle a été construit pour une application basse tension - haut courant. La tension côté basse tension du convertisseur est de 18 V, la puissance maximale transitant dans le convertisseur est de 4800 W et le courant maximal de 266 A. Une configuration originale de la structure a été adoptée, dans laquelle le convertisseur fonctionne en mode élévateur dans la direction de puissance allant de la batterie aux supercondensateurs. Cette configuration permet de réduire une partie des pertes en conduction dans le contexte où la tension de la batterie est faible. Une platine expérimentale du convertisseur est réalisée et un rendement maximal de 96.3 % est

mesuré. Ce rendement est élevé en comparaison avec d'autres types de convertisseurs pour le cas d'une application à très basse tension et haut courant tel qu'il est souvent rencontré pour des applications d'assistance en puissance à base de supercondensateurs.

8.3 Perspectives

Les perspectives résultant de ce travail sont très nombreuses dans le cadre actuel pour la recherche concernant la diminution de la consommation énergétique des véhicules. Cette thèse a développé des outils spécifiques pour déterminer dans quelles conditions l'ajout d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie embarqué permet de diminuer de manière significative la consommation énergétique d'un véhicule malgré le surcroît de poids qui est associé.

Les parcours types et les véhicules qui ont été retenus dans les exemples d'applications correspondent à des parcours réels et à des véhicules actuellement en exploitation. Toutefois, il n'est pas possible de généraliser les résultats obtenus pour les catégories de véhicules étudiés à cause de la multitude de paramètres influençant la consommation énergétique des véhicules. Les outils de calculs, les méthodes et les concepts développés dans cette thèse peuvent être utilisés pour déterminer la réduction de la consommation énergétique pour tout autre parcours ou tout autre véhicule que ceux qui ont été pris comme exemple dans ce travail.

Dans le chapitre concernant un réseau de véhicules alimentés par caténaires, de nouvelles fonctionnalités devraient être ajoutées dans le simulateur développé. Par exemple, seule la solution concernant un système d'assistance en puissance embarqué dans le véhicule a été étudiée. L'ajout de poids dans un véhicule augmentant sa consommation énergétique, il serait intéressant d'étudier dans le futur l'effet d'un système d'assistance en puissance avec un stockeur d'énergie fixe qui serait connecté directement à la caténaire. Dans ce cas, le stockeur serait rechargé lors des freinages des véhicules et réinjecterait de la puissance sur la caténaire lors de fortes contraintes en puissance sur le réseau.

Il existe actuellement de nombreuses études sur les véhicules dont la source d'énergie est composée d'hydrogène. Ce type de véhicules montre un important potentiel pour une application à long terme. Dans ces vé-

hicules utilisant des piles à combustible, deux des nombreux problèmes concernent les fortes variations de puissance et leurs coûts. Un système d'assistance en puissance tel que décrit dans cette thèse permet d'apporter une solution à ces deux problèmes, en utilisant le concept de "downsizing". Il permet également de récupérer l'énergie de freinage de manière optimale. Les outils qui ont été développés dans cette thèse peuvent être adaptés à ce type de véhicules.

Dans ce travail, les considérations concernant les aspects économiques, les questions de sécurité lors de l'utilisation de supercondensateurs dans des systèmes embarqués et de cycle de vie de ce composant stockeur d'énergie n'ont pas été pris en compte. Ces différents critères devront être évalués avant une utilisation industrielle.

Cette thèse a montré une étude complète d'un système d'assistance en puissance spécialement développé pour le domaine des transports. Le concept introduit dans cette thèse pour le cas spécifique des véhicules hybrides peut être étendu de manière générale aux systèmes hybrides.

Annexe *A*

Relations pour un convertisseur DC/DC multicanal

A.1 Relations pour un convertisseur de type abaisseur

Le développement des relations pour le calcul de l'inductance de lissage pour un convertisseur de type abaisseur va être réalisé dans cette annexe. Il s'agira principalement de caractériser les valeurs de l'inductance pour assurer un mode de fonctionnement discontinu du convertisseur.

La structure d'un convertisseur abaisseur est donnée dans la figure ci-dessous (fig. A.1).

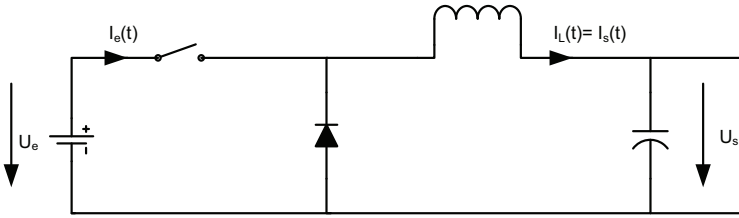


FIG. A.1 – Structure typique d'un convertisseur abaisseur

Pour le calcul des ondulations de courant, il est nécessaire de s'intéresser aux ondulations de courant dans l'inductance de lissage. Différents cas doivent être pris en compte :

1. Conduction continue
2. Conduction critique
3. Conduction discontinue

Dans les graphiques qui suivent (fig. A.2, A.3 et A.4), les ondulations de courant sont représentées pour les différents cas de conduction.

Une condition pour le mode de conduction critique est :

$$\langle I_L \rangle = \frac{1}{2} \widehat{I_L} \quad (\text{A.1})$$

Une condition nécessaire et suffisante pour un fonctionnement du convertisseur en conduction discontinue en est déduite :

$$\langle I_L \rangle < \frac{1}{2} \Delta I_L \quad (\text{A.2})$$

En mode de conduction **normale**, lors d'une phase **ascendante** du courant :

$$I_L(t) = a + \frac{U_e - U_s}{L} t \quad \text{pour } 0 \leq t \leq T_e \quad (\text{A.3})$$

$$I_L(t = T_e) = b \quad (\text{A.4})$$

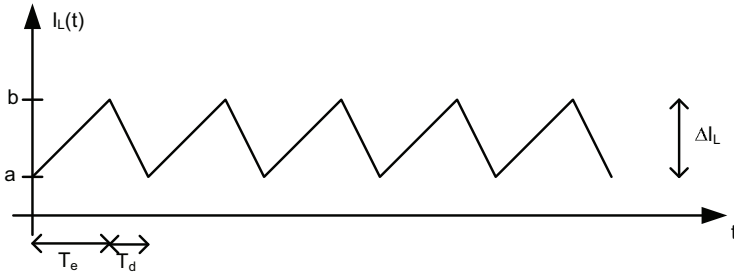


FIG. A.2 – Ondulations du courant dans le cas d'une conduction continue

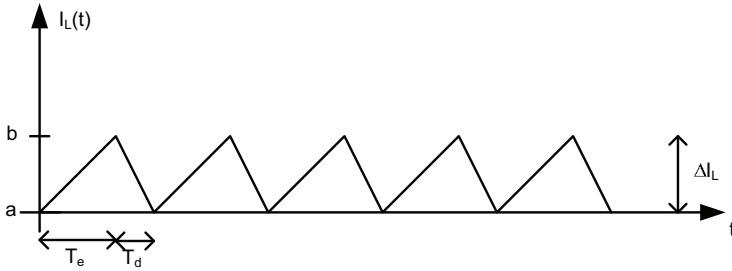


FIG. A.3 – Ondulations du courant dans le cas d'une conduction critique

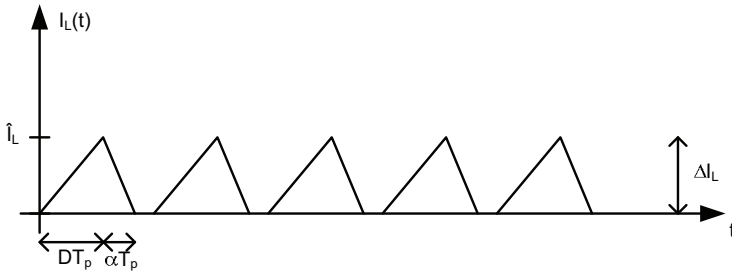


FIG. A.4 – ondulations du courant dans le cas d'une conduction discontinue

D'où :

$$b = a + \frac{U_e - U_s}{L} T_e \quad T_e = D T_p \quad (\text{A.5})$$

$$b - a = \frac{U_e - U_s}{L} T_e = \frac{U_e - U_s}{L} D T_p = \Delta I_L \quad (\text{A.6})$$

En mode de conduction **normale**, lors d'une phase **descendante** du courant :

$$I_L(t) = b - \frac{U_s}{L} t \quad \text{pour } T_e < t \leq T_p \quad (\text{A.7})$$

$$I_L(t = T_d) = a \quad (\text{A.8})$$

D'où :

$$a = b - \frac{U_s}{L} T_d \quad (\text{A.9})$$

$$b - a = \frac{U_s}{L} T_d = \frac{U_s}{L} (1 - D) T_p = \Delta I_L \quad (\text{A.10})$$

En résumé :

$$\Delta I_L = \frac{U_e - U_s}{L} D T_p = \frac{U_s}{L} (1 - D) T_p \quad (\text{A.11})$$

D'où :

$$U_s = U_e \cdot D \quad (\text{A.12})$$

En reprenant la condition nécessaire et suffisante pour le calcul de l'inductance de lissage et en remplaçant par les relations trouvées lors des phases montantes et descendantes du courant dans l'inductance :

$$\langle I_L \rangle < \frac{1}{2} \Delta I_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_s}{L} \cdot T_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{D U_e}{L} \cdot (1 - D) \cdot T_p \quad (\text{A.13})$$

$$L < \frac{1}{2} \cdot \frac{D \cdot (1 - D) \cdot U_e}{\langle I_L \rangle \cdot f_p} \quad (\text{A.14})$$

La valeur maximale de l'inductance pour assurer un mode de fonctionnement discontinu dans tous les cas est donnée par :

$$\mathbf{L}_{\max} = \min \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathbf{D} \cdot (1 - \mathbf{D}) \cdot \mathbf{U}_e}{< \mathbf{I}_L > \cdot \mathbf{f}_p} \right\} \quad (\text{A.15})$$

En mode de conduction **discontinue**, en régime permanent et lors d'une phase **ascendante** du courant :

$$I_L(t) = \frac{U_e - U_s}{L} t \quad \text{pour } 0 \leq t \leq T_e \quad (\text{A.16})$$

$$I_L(t = T_e) = b = \frac{U_e - U_s}{L} T_e = \frac{U_e - U_s}{L} D T_p \quad (\text{A.17})$$

En mode de conduction **discontinue**, en régime permanent et lors d'une phase **descendante** du courant :

$$I_L(t) = b - \frac{U_s}{L} t \quad \text{pour } T_e < t \leq T_p \quad (\text{A.18})$$

$$I_L(t = T_d) = 0 = b - \frac{U_s}{L} T_d = b - \frac{U_s}{L} \alpha T_p \quad (\text{A.19})$$

De ces deux modes de fonctionnement, il est possible de déduire les variations de courant ΔI :

$$\Delta I = \frac{U_e - U_s}{L} D T_p = \frac{U_s}{L} \alpha T_p \quad (\text{A.20})$$

Il est possible de déterminer le rapport cyclique dans le cas d'un fonctionnement à régime permanent :

$$\mathbf{U}_e \cdot \mathbf{D} = \mathbf{U}_s \cdot (\mathbf{D} + \alpha) \quad (\text{A.21})$$

Pour la détermination du rapport entre les courants moyens à l'entrée et à la sortie du système, il est nécessaire de se rapporter à la figure ci-dessous (figure A.5).

De ces graphiques, il vient :

$$\frac{I_s}{(D + \alpha) \cdot T_p} = \frac{I_e}{D \cdot T_p} \quad (\text{A.22})$$

D'où :

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_s = (\mathbf{D} + \alpha) \cdot \mathbf{I}_e \quad (\text{A.23})$$

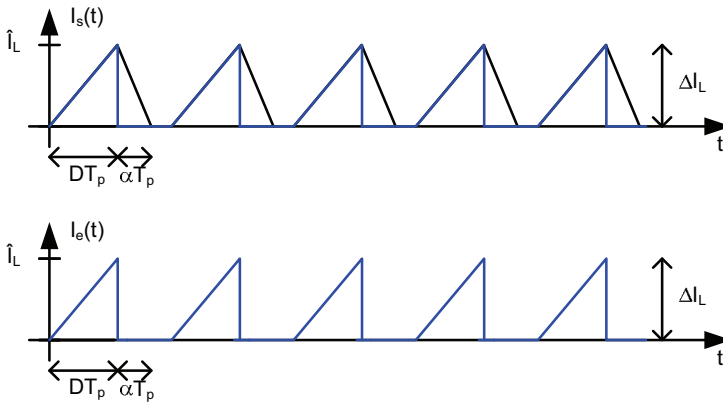


FIG. A.5 – Ondulations du courant dans le cas d'une conduction discontinue

A.2 Relations pour un convertisseur de type élévateur

Dans cette section, les différentes relations pour un convertisseur de type élévateur vont être déterminées. Les différents modes de conduction vont être décrits. Le calcul de l'inductance de lissage pour assurer un mode de fonctionnement va également être décrit.

La structure d'un convertisseur élévateur est donnée dans la figure ci-dessous (fig. A.6).

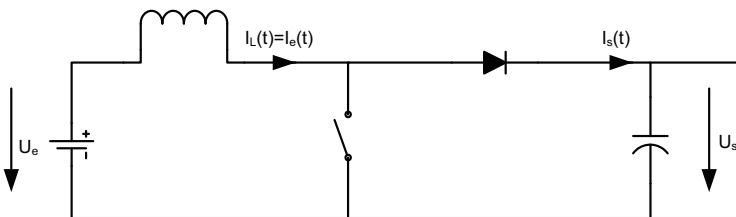


FIG. A.6 – Structure typique d'un convertisseur

Les différents modes de conduction possibles pour un convertisseur de type élévateur sont :

1. Conduction continue
2. Conduction critique
3. Conduction discontinue

Dans les graphiques qui suivent (fig. A.7, A.8 et A.9), les ondulations de courant sont représentées pour les différents cas de conduction.

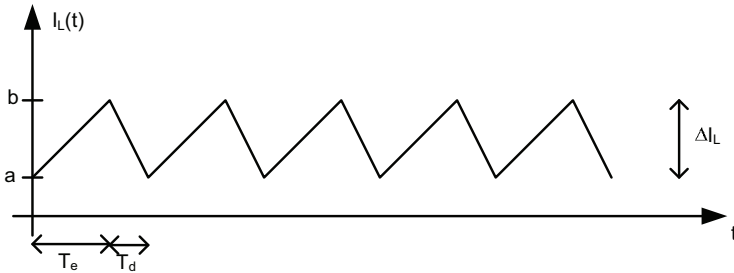


FIG. A.7 – Ondulations du courant dans le cas d'une conduction continue

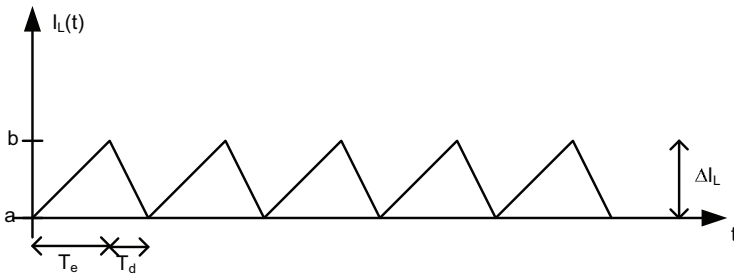


FIG. A.8 – Ondulations du courant dans le cas d'une conduction critique

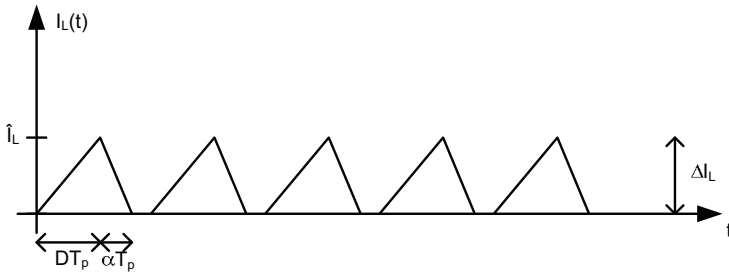


FIG. A.9 – Ondulations du courant dans le cas d'une conduction discontinue

Une condition pour le mode de conduction critique est :

$$\langle I_L \rangle = \frac{1}{2} \widehat{I_L} \quad (\text{A.24})$$

Une condition nécessaire et suffisante pour un fonctionnement du convertisseur en conduction discontinue en est déduite :

$$\langle I_L \rangle < \frac{1}{2} \Delta I_L \quad (\text{A.25})$$

En mode de conduction **normale**, lors d'une phase **ascendante** du courant :

$$I_L(t) = a + \frac{U_e}{L} t \quad \text{pour } 0 \leq t \leq T_e \quad (\text{A.26})$$

$$I_L(t = T_e) = b \quad (\text{A.27})$$

D'où :

$$b = a + \frac{U_e}{L} T_e \quad T_e = DT_p \quad (\text{A.28})$$

$$b - a = \frac{U_e}{L} T_e = \frac{U_e}{L} DT_p = \Delta I_L \quad (\text{A.29})$$

En mode de conduction **normale**, lors d'une phase **descendante** du courant :

$$I_L(t) = b + \frac{U_e - U_s}{L}t \quad \text{pour } T_e < t \leq T_p \quad (\text{A.30})$$

$$I_L(t = T_d) = a \quad (\text{A.31})$$

D'où :

$$a = b + \frac{U_e - U_s}{L}T_d \quad (\text{A.32})$$

$$b - a = \frac{U_s - U_e}{L}(1 - D)T_p = \Delta I_L \quad (\text{A.33})$$

En résumé :

$$\Delta I_L = \frac{U_e}{L}DT_p = \frac{U_s - U_e}{L}(1 - D)T_p \quad (\text{A.34})$$

D'où :

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - D} \quad (\text{A.35})$$

En reprenant la condition nécessaire et suffisante pour le calcul de l'inductance de lissage et en remplaçant par les relations trouvées lors des phases montantes et descendantes du courant dans l'inductance :

$$< I_L > < \frac{1}{2}\Delta I_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_e}{L} \cdot D \cdot T_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{DU_e}{Lf_p} \quad (\text{A.36})$$

La valeur maximale de l'inductance pour assurer un mode de fonctionnement discontinu dans tous les cas est donnée par :

$$\mathbf{L_{max}} = \min \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathbf{D \cdot U_e}}{< \mathbf{I_L} > \cdot \mathbf{f_p}} \right\} \quad (\text{A.37})$$

En mode de conduction **discontinue**, en régime permanent et lors d'une phase **descendante** du courant :

$$I_L(t) = \frac{U_e}{L}t \quad \text{pour } 0 \leq t \leq T_e \quad (\text{A.38})$$

$$I_L(t = T_e) = b = \frac{U_e}{L}T_e = \frac{U_e}{L}DT_p \quad (\text{A.39})$$

En mode de conduction **discontinue**, en régime permanent et lors d'une phase **ascendante** du courant :

$$I_L(t) = b + \frac{U_e - U_s}{L}t \quad \text{pour } T_e < t \leq T_p \quad (\text{A.40})$$

$$I_L(t = T_d) = 0 = b + \frac{U_e - U_s}{L}T_d = b + \frac{U_e - U_s}{L}\alpha T_p \quad (\text{A.41})$$

De ces deux modes de fonctionnement, il est possible de déduire les variations de courant ΔI :

$$\Delta I = \frac{U_e}{L}DT_p = \frac{U_s - U_e}{L}\alpha T_p \quad (\text{A.42})$$

Il est possible de déterminer le rapport cyclique dans le cas d'un fonctionnement à régime permanent :

$$\mathbf{U}_e \cdot (\mathbf{D} + \alpha) = \mathbf{U}_s \cdot \alpha \quad (\text{A.43})$$

Pour la détermination du rapport entre les courants moyens à l'entrée et à la sortie du système, il est nécessaire de se rapporter à la figure ci-dessous (fig. A.10).

De ces graphiques, il vient :

$$\frac{I_e}{(D + \alpha) \cdot T_p} = \frac{I_s}{\alpha \cdot T_p} \quad (\text{A.44})$$

D'où :

$$\alpha \cdot \mathbf{I}_e = (\mathbf{D} + \alpha) \cdot \mathbf{I}_s \quad (\text{A.45})$$

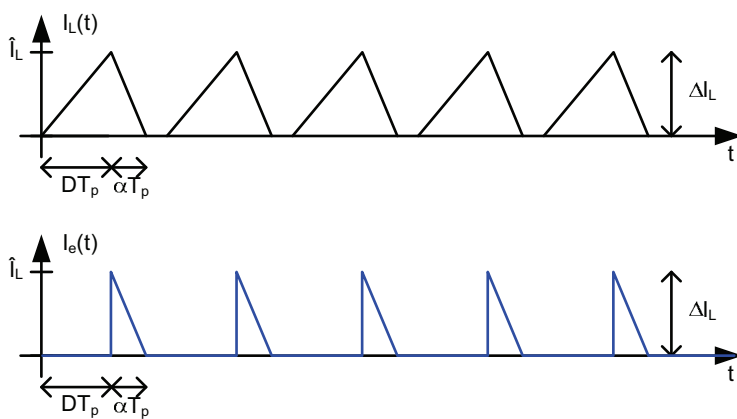


FIG. A.10 – Ondulations du courant dans le cas d'une conduction discontinue

Annexe *B*

Interfaces graphiques du simulateur de réseau de transport alimenté par caténaire

B.1 Interface pour l'introduction des paramètres

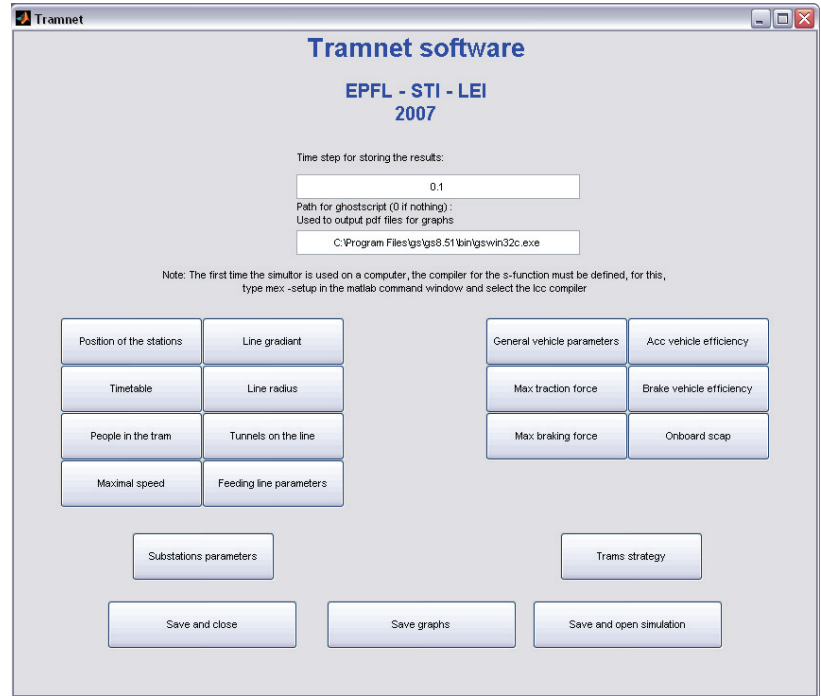


FIG. B.1 – Interface pour introduire les variables dans le simulateur de réseau de transport alimentés par caténaire

B.2 Interface pour l'affichage des résultats

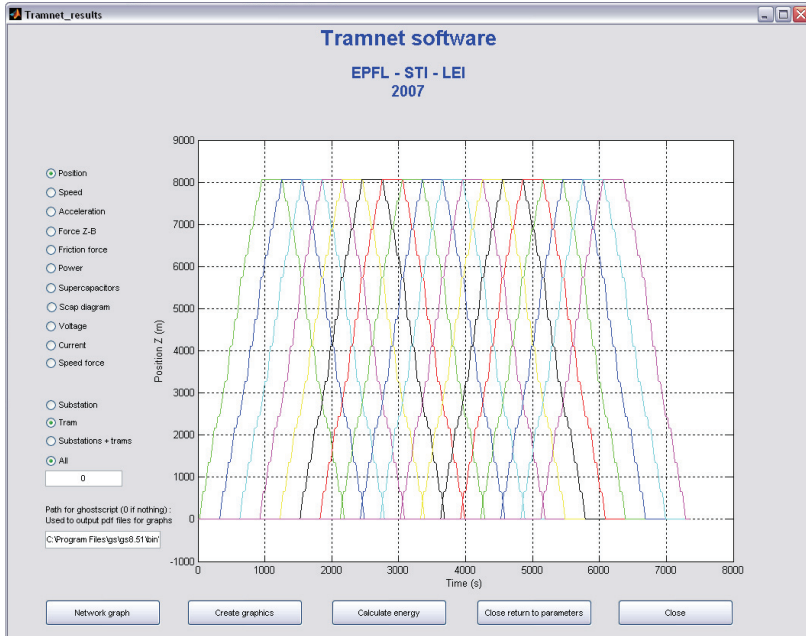


FIG. B.2 – Interface pour exploiter les résultats du simulateur de réseau de transport alimentés par caténaire

Annexe *C*

Consommation d'un réseau de véhicules alimenté par caténaires

C.1 Variation de la proportion de véhicules avec un stockeur

Proportion de véhicules avec un stockeur d'énergie (%)	Consommation	Diminution par rapport au cas sans stockeur
0 %	567.1 kWh	
25 %	553.3 kWh	- 2.4 %
50 %	541.4 kWh	- 4.5 %
75 %	531.4 kWh	- 6.3 %
100 %	521.3 kWh	- 8.1 %

TAB. C.1 – Comparaison des résultats (Fonction du nombre de véhicules ayant un stockeur d'énergie embarqué)

C.2 Variation du poids à vide des véhicules

	Réseau de trams sans scap	Réseau de trams mixtes	Réseau de trams avec scap
Véhicule, poids standard	567.1 kWh	541.4 kWh	521.3 kWh
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 4.5 %	- 8.1 %
Véhicule, poids à vide moins 2 t	563.3 kWh - 0.67 %	538.1 kWh - 0.61 %	517.1 kWh - 0.81 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 4.5 %	- 8.2 %
Véhicule, poids à vide moins 4 t	558.2 kWh - 1.6 %	532.2 kWh - 1.7 %	512.2 kWh - 1.8 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 4.7 %	-8.2 %
Véhicule, poids à vide moins 6 t	552.4 kWh - 2.6 %	526.7 kWh - 2.7 %	506.8 kWh - 2.8 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 4.7 %	- 8.3 %

TAB. C.2 – Comparaison des résultats (Variation du poids à vide du véhicule)

C.3 Variation de la puissance des auxiliaires

	Réseau de trams sans scap	Réseau de trams mixtes	Réseau de trams avec scap
$P_{aux} = 30\text{kW}$	567.1 kWh	541.4 kWh	521.3 kWh
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 4.5 %	- 8.1 %
$P_{aux} = 25\text{kW}$	544.5 kWh - 4.0 %	517.1 kWh - 4.5 %	495.1 kWh - 5.0 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 5.0 %	- 9.1 %
$P_{aux} = 20\text{kW}$	522.1 kWh - 7.9 %	493.0 kWh - 8.6 %	468.5 kWh - 10.1 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 5.6 %	- 10.3 %
$P_{aux} = 15\text{kW}$	500.1 kWh - 11.8 %	469.3 kWh - 13.3 %	442.5 kWh - 15.1 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 6.2 %	- 11.5 %
$P_{aux} = 10\text{kW}$	478.5 kWh - 15.6 %	445.7 kWh - 17.7 %	416.7 kWh - 20.1 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 6.9 %	- 12.9 %
$P_{aux} = 5\text{kW}$	457.2 kWh - 19.4 %	422.5 kWh - 22.0 %	391.2 kWh - 25.0 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 7.6 %	- 14.4 %
$P_{aux} = 0\text{kW}$	436.2 kWh - 23.1 %	399.5 kWh - 22.6 %	366.1 kWh - 29.8 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 8.4 %	- 16.1 %

TAB. C.3 – Comparaison des résultats (Variation de la puissance des auxiliaires)

C.4 Variation de la résistance linéique de ligne

	Réseau de trams sans scap	Réseau de trams mixtes	Réseau de trams avec scap
Résistance de ligne $R_{eq,lin}$ standard	567.1 kWh	541.4 kWh	521.3 kWh
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 4.5 %	- 8.1 %
Résistance de ligne = $4 \times R_{eq,lin}$ standard	649.0 kWh + 14.4 %	604.3 kWh + 11.6 %	560.6 kWh + 7.5 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 6.9 %	- 13.6 %
Résistance de ligne = $R_{eq,lin}$ standard / 4	524.5 kWh - 7.5 %	514.0 kWh - 5.1 %	506.1 kWh - 2.9 %
Diminution par rapport au cas sans stockeur		- 2.0 %	- 3.5 %

TAB. C.4 – Comparaison des résultats (Variation de la résistance linéique de la ligne)

Table des figures

1.1	Comparaison entre l'évolution actualisée des émissions ("Rapport 355") et les résultats de l'ancien rapport OFEFP 255/Compléments, OFEFP 2000	2
1.2	Puissance type pour une phase accélération freinage . . .	3
2.1	Structure d'un véhicule à moteur thermique	11
2.2	Véhicule électrique standard	12
2.3	Véhicule dont la source d'énergie est un volant d'inertie (couplage mécanique)	13
2.4	Véhicule dont la source d'énergie est un volant d'inertie (couplage électrique)	14
2.5	Véhicule dont la source d'énergie est de l'air comprimé .	14
2.6	Véhicule à base de pile à combustible standard	16
2.7	Véhicule hybride série	18
2.8	Véhicule hybride parallèle	18
2.9	Véhicule hybride série - parallèle	19
2.10	Représentation des forces dans un véhicule	22
2.11	Contraintes en puissance en fonction de la masse du véhicule (véhicule chargé de 200 personnes)	23
2.12	Contraintes en puissance en fonction de la pente α . . .	25

TABLE DES FIGURES

2.13	Contraintes en puissance avec un système d'assistance en puissance optimal	27
2.14	Energie consommée par le véhicule sans stockeur ; vhc de type tram, $m_e = 0$ t, $v_{max} = 75$ km/h	29
2.15	Taille optimale du stockeur ; vhc de type tram, $m_e = 0$ t, $v_{max} = 75$ km/h	30
2.16	Réduction de la consommation ; vhc de type tram, $m_e = 0$ t, $v_{max} = 75$ km/h	30
2.17	Réduction de la consommation ; vhc de type tram, $m_e = 0$ t, $v_{max} = 25$ km/h	31
2.18	Réduction de la consommation ; vhc de type scooter, $m_e = 80$ kg, $v_{max} = 75$ km/h	32
3.1	Volant d'inertie fabriqué par Magnet-Motor, utilisé dans les bus de Bâle	37
3.2	Photo du volant d'inertie utilisé dans les bus de Bâle	39
3.3	Photo d'un tram de type Alstom Citadis dans la ville de Rotterdam	40
3.4	Photo du volant d'inertie du tramway Alstom Citadis	40
3.5	Photo du réservoir d'air comprimé de la Tata MiniCat	42
3.6	Photo de la Tata MiniCat, véhicule à air comprimé	43
3.7	Capacité relative d'une batterie en fonction du Depth Of Discharge (DOD)	45
3.8	Photo de la Tzero	45
3.9	Pack de batteries de la Tzero ; Source : en.wikipedia.org	46
3.10	Photo du tram Bombardier avec le stockeur "Mitrac Energy Saver"	48
3.11	Photo du stockeur d'énergie "Mitrac Energy Saver"	49
3.12	Nombre de cycles maximaux en fonction du type de stockeur d'énergie	50
3.13	Diagramme de Ragone pour une batterie	52
3.14	Diagramme de Ragone pour un condensateur	53
3.15	Diagramme de Ragone pour un SMES	54
3.16	Plan de Ragone	55
4.1	Plan de la ligne retenue	60
4.2	Altitude sur le parcours en fonction de la position	61
4.3	Courbes sur le parcours en fonction de la position	62

4.4	Vitesse maximale du véhicule sur le parcours en fonction de la position	62
4.5	Photo du véhicule 6MGT	64
4.6	Flux d'énergie à bord du véhicule 6MGT	65
4.7	Schéma structurel d'un véhicule standard alimenté par caténaire	66
4.8	Schéma structurel d'un véhicule alimenté par caténaire avec un système d'assistance en puissance	66
4.9	Structure actuelle du véhicule	69
4.10	Structure du véhicule avec un stockeur série	69
4.11	Structure du véhicule avec stockeur parallèle	69
4.12	Structure du simulateur	74
4.13	Bilan des forces pour le véhicule	75
4.14	Diagramme mécanique pour la transmission	80
4.15	Chaîne mécanique	80
4.16	Structure de la chaîne électrique	81
4.17	Modèle de la ligne	82
4.18	Simplification du modèle de la ligne	83
4.19	Modèle de la ligne retenu	84
4.20	Modèle des sous-stations	85
4.21	Modèle du noeud bilan 1 : Source de tension idéale et sous-station	85
4.22	Modèle du noeud bilan 2 : Capacitif et sous-station	86
4.23	Structure du simulateur avec les constantes de temps	87
4.24	Accélération - freinage d'un véhicule sans stockeur	91
4.25	Accélération - freinage d'un véhicule avec stockeur	93
4.26	Puissances d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule sur la ligne)	95
4.27	Tension à la ligne d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule sur la ligne)	95
4.28	Puissances d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)	98
4.29	Tension à la ligne d'un véhicule sans stockeur (1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)	98
4.30	Puissances d'un véhicule avec stockeur (1 véhicule sur la ligne)	101
4.31	Tension à la ligne d'un véhicule avec stockeur (1 véhicule sur la ligne)	101

TABLE DES FIGURES

4.32	Puissances d'un véhicule avec stockeur (1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)	103
4.33	Tension à la ligne d'un véhicule avec stockeur (1 véhicule toutes les 5 minutes sur la ligne)	103
4.34	Energie totale en fonction de la part de véhicules avec stockeur sur le réseau	109
4.35	Energie totale consommée par le système en fonction du poids à vide des véhicules	110
4.36	Energie totale consommée par le système en fonction de la puissance des auxiliaires des véhicules	111
4.37	Energie totale consommée par le système en fonction de la résistance de ligne	113
5.1	Dénivellation du parcours de référence	121
5.2	Vitesse du véhicule sur le parcours type	122
5.3	Accélération du véhicule sur le parcours type	122
5.4	Schéma du véhicule de référence	123
5.5	Photo du véhicule de référence	124
5.6	Flux d'énergie dans le véhicule de référence	125
5.7	Gestion énergétique à bord du véhicule de référence	126
5.8	Puissance des moteurs de traction pour le parcours de référence	127
5.9	Schéma structurel du véhicule de référence	129
5.10	Schéma structurel du véhicule avec un système d'assistance en puissance	129
5.11	Schéma actuel de l'automotrice articulée GTW	130
5.12	Branchement série du banc de supercondensateurs	130
5.13	Branchement parallèle du banc de supercondensateurs	131
5.14	Régulation pour le système d'assistance en puissance	135
5.15	Lissage des puissances accélération - freinage 1	137
5.16	Lissage des puissances accélération - freinage 2	139
5.17	Lissage montée - descente	140
5.18	Puissance pour le parcours type	142
5.19	Puissance délivrée par le moteur diesel pour le cas de moteur diesel de 380 kW (dimensionnement optimal)	144
5.20	Puissance des supercondensateurs pour le cas de moteur diesel de 380 kW (dimensionnement optimal)	145

5.21	Taille du moteur diesel nécessaire en fonction de la taille du stockeur d'énergie	145
5.22	Puissance délivrée par le moteur diesel pour le cas du moteur diesel de 380 kW	151
5.23	Puissance du banc supercapacitif pour le cas de moteur diesel de 380 kW	151
5.24	Tension aux bornes du banc de supercondensateurs . . .	152
5.25	Coûts d'exploitation et investissement supplémentaire .	161
6.1	Photo du scooter Peugeot Scoot'Elec	167
6.2	Schéma bloc du véhicule de référence	169
6.3	Photo de l'intérieur du scooter équipé pour les mesures .	171
6.4	Vitesse sur le parcours de référence	172
6.5	Tension aux bornes des batteries	173
6.6	Courant des batteries	173
6.7	Tension aux bornes du moteur	175
6.8	Courant du moteur	175
6.9	Schéma bloc du système d'assistance en puissance pour le véhicule de référence	177
6.10	Caractéristique des puissances pour la détermination de la taille du stockeur d'énergie additionnel	180
6.11	Caractéristique de l'énergie pour la détermination de la taille du stockeur	180
6.12	Schéma de régulation pour la gestion énergétique à bord du véhicule	186
6.13	Résultat des simulations : Puissance du moteur	187
6.14	Résultat des simulations : Puissance des batteries	188
6.15	Résultat des simulations : Puissance du banc de supercondensateurs	188
6.16	Résultat des simulations : Tension des batteries	189
6.17	Résultat des simulations : Courant des batteries	190
6.18	Résultat des simulations : Tension du banc de supercondensateurs	191
6.19	Résultat des simulations : Courant du banc de supercondensateurs	191
7.1	Schéma du convertisseur DC/DC multicanal entrelacé .	197

7.2	Définition des courants et tensions pour les pertes par commutations	200
7.3	Graphique des commutations pour une branche	201
7.4	Graphique du courant dans un canal	201
7.5	Stratégie de commande implémentée pour le convertisseur multicanal (représenté ici pour 2 canaux)	205
7.6	Conséquence sur le courant dans le cas d'une dissymétrie entre 2 canaux	206
7.7	Régulateur pour le convertisseur multicanal	207
7.8	Ondulations maximales de courant	211
7.9	Rendement = $f(N_{can})$ (Tension côté haute tension $U_e = 28$ V)	214
7.10	Rendement = $f(N_{can})$ (Tension côté haute tension $U_e = 56$ V)	214
7.11	Courant dans chaque canal pour $P = 4\ 800$ W, $N_{can} = 12$ canaux; $U_e = 28$ V	215
7.12	Courant dans chaque canal pour $P = 4\ 800$ W, $N_{can} = 12$ canaux; $U_e = 56$ V	216
7.13	Courant dans chaque canal pour $P = 4\ 800$ W; $N_{can} = 8$ canaux; $U_e = 28$ V	218
7.14	Courant dans chaque canal pour $P = 4\ 800$ W; $N_{can} = 8$ canaux; $U_e = 56$ V	218
7.15	Courant du côté basse tension pour $P = 4\ 800$ W; $N_{can} = 8$ canaux; $U_e = 28$ V	219
7.16	Courant du côté basse tension pour $P = 4\ 800$ W; $N_{can} = 8$ canaux; $U_e = 56$ V	219
7.17	Courant du côté haute tension pour $P = 4\ 800$ W; $N_{can} = 8$ canaux; $U_e = 28$ V	220
7.18	Courant du côté haute tension pour $P = 4\ 800$ W; $N_{can} = 8$ canaux; $U_e = 56$ V	221
7.19	Ondulations totales de courant en fonction du rapport cyclique pour différentes valeurs de tension U_e	221
7.20	Réponse du convertisseur à des sauts de consigne de puissance	222
7.21	Réponse du convertisseur à des sauts de consigne de puissance (réponse en courant)	223
7.22	Photo du convertisseur multicanal réalisé	224

7.23	Mesures du courant pour le 1er canal; $N_{can} = 4$; $U_e = 30V$; $P = 2400W$	226
7.24	Mesures des tensions Grille-Source des transistors MOS pour le 1er canal; $N_{can} = 4$; $U_e = 30V$; $P = 2400W$. .	226
7.25	Mesures du courant dans les canaux; $N_{can} = 4$ canaux; $U_e = 30V$; $P = 2400W$	227
7.26	Mesures du courant total côté basse tension; $N_{can} = 4$ ca- naux; $U_e = 30V$; $P = 2400W$	228
7.27	Rendement mesuré pour un fonctionnement en 4 canaux, $U_e = 35V$	229
A.1	Structure typique d'un convertisseur abaisseur	242
A.2	Ondulations du courant dans le cas d'une conduction con- tinue	243
A.3	Ondulations du courant dans le cas d'une conduction cri- tique	243
A.4	ondulations du courant dans le cas d'une conduction dis- continue	243
A.5	Ondulations du courant dans le cas d'une conduction dis- continue	246
A.6	Structure typique d'un convertisseur	246
A.7	Ondulations du courant dans le cas d'une conduction con- tinue	247
A.8	Ondulations du courant dans le cas d'une conduction cri- tique	247
A.9	Ondulations du courant dans le cas d'une conduction dis- continue	248
A.10	Ondulations du courant dans le cas d'une conduction dis- continue	251
B.1	Interface pour introduire les variables dans le simulateur de réseau de transport alimentés par caténaire	254
B.2	Interface pour exploiter les résultats du simulateur de réseau de transport alimentés par caténaire	255

Liste des tableaux

2.1	Energie consommée et énergie dissipée en fonction de la masse du véhicule (véhicule chargé de 200 personnes) . .	24
2.2	Energie consommée et énergie dissipée en fonction de la déclivité	26
3.1	Types de batteries possibles pour le véhicule électrique .	44
4.1	Caractéristiques du véhicule 6MGT	64
4.2	Tableau des coefficients ζ	76
4.3	Coefficient k_e en fonction de l'écartement entre les rails	78
4.4	Coefficient k_t en fonction du type de tunnel	79
4.5	Résistance linéique équivalente	90
4.6	Comparaison des résultats (1 véhicule sur la ligne) . . .	105
4.7	Comparaison des résultats (Réseaux de véhicules)	107
5.1	Caractéristiques du véhicule GTW utilisé sur la ligne Merano-Malles	124
5.2	Nombre de supercondensateurs nécessaire en fonction de la taille du moteur diesel	146
5.3	Résumé des cas étudiés pour le calcul du nombre optimal de supercondensateurs nécessaire	148

5.4	Résumé des simulations pour les différents cas de moteurs diesel	154
5.5	Différences des composants entre le véhicule de référence et le véhicule avec un stockeur d'énergie supercapacitif .	156
5.6	Variations des coûts de fabrication entre le véhicule de référence et le véhicule à stockage supercapacitif	157
5.7	Variations des coûts d'exploitation entre le véhicule de référence et le véhicule avec un stockeur supercapacitif .	159
6.1	Caractéristiques du Peugeot Scoot'Elec	168
6.2	Parcours mesurés avec le Scoot'Elec	171
6.3	Caractéristiques des supercondensateurs BCAP0010 . .	181
6.4	Arrangements possibles des supercondensateurs dans le banc	182
6.5	Comparaison des masse et volume entre le véhicule de référence et le véhicule avec un système d'assistance en puissance	185
7.1	Valeur de l'inductance et du courant instantané maximum dans chaque canal en fonction du nombre N_{can} de canaux	211
7.2	Résistance de passage des inductances retenues	213
C.1	Comparaison des résultats (Fonction du nombre de véhicules ayant un stockeur d'énergie embarqué)	258
C.2	Comparaison des résultats (Variation du poids à vide du véhicule)	259
C.3	Comparaison des résultats (Variation de la puissance des auxiliaires)	260
C.4	Comparaison des résultats (Variation de la résistance linéique de la ligne)	261

Bibliographie

- [1] OFEFP, *Emissions de polluants atmosphériques dues au trafic routier entre 1980 et 2030*. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Suisse, 2004.
- [2] Toyota, *Toyota Prius - The future starts here*. Toyota Presskit Prius, 2007.
- [3] M. Weilenmann, A.-M. Vasic, and P. Novak, *Influence of mobile air-conditioning on vehicle emissions and fuel consumption : A model approach for modern gasoline cars used in Europe*. Vol. 39, Environ. Sci, Technol, p. 9601-9610, 2005.
- [4] P.-R. Bauquis, *Quelles énergies pour les transports au XXIe siècle*. Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs, 1999.
- [5] P. Barrade and A. Rufer, *High-power fast energy exchange between storage system : Supercapacitors as energy buffer in transportation systems*. EVS-18 : The 18th international vehicle symposium, Berlin, Germany, 2001.
- [6] B. Maher, *Ultracapacitors and the hybrid electric vehicle*. White paper, Maxwell technologies, 2007.
- [7] G. Reiner and W. Weck, *Operation experience with magnetodynamic flywheel storage systems in public transport bus*. EESAT 2000, Orlando, Floride, Sept. 2000.

- [8] A. Rufer, *Solutions for storage of electrical energy*. ANAE : Associazione nazionale azionamenti elettrici, 14o seminario interattivo, Azionamenti elettrici : evoluzione tecnologica e problematiche emergenti, 2003.
- [9] M. Alamgir, *Recent development of large-size lithium-ion polymer battery for HEV applications*. LLIBTA, First international symposium on large lithium ion battery technology and application, Honolulu, Hawaï, 2005.
- [10] G. Monnier, *Le challenge CO2 : Quelles technologies pour le moteur à essence*. Journées AFTP, 2006.
- [11] A. Schneuwly, B. Maher, and J. Auer, *Ultracapacitors, the new thinking in the automotive world*. White paper, Maxwell technologies, 2007.
- [12] P. Mellor, N. Schofield, and D. Howe, *Flywheel and supercapacitor peak power buffer technologies*. The University of Sheffield, 2000.
- [13] P. Barrade, *Electronique de puissance : Méthodologie et convertisseurs élémentaires*. Collection électricité, ISBN 2-88074-566-7, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006.
- [14] M. Westbrook, *The electric car : Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*. ISBN 0-85296-013-1, The Institution of electrical engineers, London, UK, 1988.
- [15] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles : Fundamentals, theory, and design*. ISBN 0-8493-3154-4, CRC Press LLC, 2005.
- [16] Toyota, *Toyota hybrid system : THS II*. Toyota Motor Corporation, www.toyota.co.jp, 2003.
- [17] CEMT, *Evolution des transports 1970 - 2002*. ISBN 92-821-0324-2, CEMT : Conférence européenne des ministères des transports, 2002.
- [18] J.-M. Savin, *L'évolution des distances moyennes de transport de marchandises*. Statistiques françaises, 2000.
- [19] M. Kaiser, *The aluminium spaceframe*. The Manufacturing Engineer, Volume 77, Issue 3, p. 125-129, June 1998.
- [20] A. Brooks, *The Tzero electric sports car - How electric vehicles can achieve both high performance and high efficiency*. EVS 17 : 17th electric vehicle conference, Montreal, Canada, 2000.

-
- [21] Oerlikon, *The Oerlikon Electrogyro, Its development and application for omnibus service*. Automobile engineer, p. 559-566, Dec. 1955.
 - [22] F. N. Werfel, U. Flogel, T. Rieder, R. Rothfeld, D. Wippich, B. Goebel, G. Reiner, and N. Wehlau, *250 kW flywheel with HTS magnetic bearing for industrial use*. EUCAS, 2007.
 - [23] Alstom, *Le volant d'inertie, Système d'énergie environnemental*. www.alstom.fr, 2006.
 - [24] G. Negre and P. Durand, *MDI 2006, Les produits*. MDI, France, 2005.
 - [25] P. Hollmuller, B. Lachal, F. Romerico, W. Weber, and J.-M. Zraggen, *L'hydrogène, futur vecteur énergétique ?* Actes de la 15ème journée du CUEPE, May 2005.
 - [26] F. Grasser, *An analytical, control-oriented state space model for a PEM fuel cell system*. Thèse n° 3445, EPFL-STI-ISE-LEI, 2005.
 - [27] R. E. Smith, *Ultracapacitor system design ; optimizing hybrid electric vehicles with fuel cell power*. White paper, Maxwell technologies, 2007.
 - [28] Michelin, *Challenge Bibendum 2004 ; Michelin contribue aux progrès de la mobilité*. Dossier de presse Michelin, Shanghai, République Populaire de Chine, 2004.
 - [29] R. Smokers, A. Dijkhuizen, and R. Winkel, *Wordwide developments and activities in the field of hybrid road-vehicle technology ; Annex VII : Hybrid Vehicles Overview Report 2000*. IEA International Energy Agency, 2000.
 - [30] ONU, *Accord concernant l'adoption de prescriptions techniques uniformes applicables aux véhicules à roues, aux équipements et aux pièces susceptibles d'être montés ou utilisés sur un véhicule à roues et les conditions de reconnaissance réciproque des homologations délivrées conformément à ces prescriptions ; Additif 23 ; Règlement No 24. Rev.1/Add.23/Rev.2/Amend.2*, Nations Unies, 2005.
 - [31] S. Delprat, *Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles*. L'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002.
 - [32] R. Hodkinson and J. Fenton, *Lightweight Electric / Hybrid Vehicle Design*. ISBN 0 7506 5092 3, Butterworth Heinemann, 2001.

- [33] W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, and P. Le Moigne, *Control strategies for maximum storage of supercapacitor sytem*. ESSCAP 2006 : 2nd European symposium on supercapacitors and applications, 2-3 November, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [34] W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol, and A. Rufer, *Design and control for a supercapacitor storage system for traction applications*. Industry application conference, Fourtieth IAS annual meeting, 2005.
- [35] K. J. Kelly, M. Mihalic, and M. Zolot, *Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight for various chassis dynamometer test procedures*. 17th annual battery conference on applications and advances, Long Beach, California, 2002.
- [36] Honda, *La nouvelle Civic IMA*. Honda Automobiles SA (Suisse), www.honda.ch, 2004.
- [37] R. Kaller and J.-M. Allenbach, *Traction électrique; volume 1*. Collection électricité, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1995.
- [38] R. Kaller and J.-M. Allenbach, *Traction électrique; volume 2*. Collection électricité, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1995.
- [39] S. M. Schoenung and C. Burns, *Utility energy storage applications studies*, vol. 11/3. IEEE Transactions on Energy Conversion, p. 658-665, Sept. 1996.
- [40] J. D. Boyes and N. H. Clark, *Technologies for energy storage flywheels and super conducting magnetic energy storage*. IEEE, 2000.
- [41] J. Bitterly, *Flywheel technology : past, present and 21st century projections*. Aerospace and electronics system magazine, IEEE, Volume 13, Issue 8, 1998.
- [42] B. Multon, G. Robin, E. Erambert, and H. Ben Ahmed, *Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires*. Colloque énergie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications, Belfort, France, 2004.
- [43] L. Romo, D. Turner, and L. Brian, *Cutting traction power costs with wayside energy storage systems in rail transit system*. JRC Joint rail conference 2005, Pueblo, Colorado, 2005.

- [44] F. Thoolen and E. Smits, *Flywheel energy storage systems*. ECPE Seminar, June 2007.
- [45] M. Richardson, *Flywheel energy storage system for traction applications*. International conference on power electronics, machines and drives, Conf public No 487, p. 275-279, 2002.
- [46] A. Rufer, D. Hotelier, and P. Barrade, *A supercapacitor-based energy-storage substation for voltage compensation in weak transportation networks*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire d'Electronique Industrielle, Lausanne, Switzerland, 2003.
- [47] A. Rufer, *Modern power conversion for complementary energy storage*. PEVD 94 : IEEE conference on power electronic and variable speed drives, 1994.
- [48] I. Cyphelly and J. Thurner, *Motor vehicle drive system*. PCT Patent, Apr. 1998.
- [49] MDI, *The OneCAT Model*. MDI Moteur Developpment International, www.theaircar.com/onecatsEN.html, Jan. 2008.
- [50] S. Lemofouet-Gatsi, *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. Thèse n° 3626, EPFL-STI-ISE-LEI, 2006.
- [51] J. Lehman, *Air storage gas turbine power plants, a major distribution for energy storage*. BHRA Fluid Engineering, Cranfield UK, International conference on energy storage, Brighton, UK, p. 327-336, Apr. 1981.
- [52] O. Weber, *Brown-Boveri Mitt.* 62. Vol. 62 No 7/8, p.332-337, 1975.
- [53] H. Kiehne, *Battery technology handbook, second edition*. ISBN 0-8247-4249-4, Expert Verlag GmbH, 2003.
- [54] M. Patel, *Spacecraft power systems*. CRC Press LLC, 2005.
- [55] J. M. Miller and R. Smith, *Ultracapacitor assisted electric drives for transportation*. White paper, Maxwell technologies, 2007.
- [56] A. Rufer and P. Barrade, *A supercapacitor-based energy-storage system for elevators with soft commutated interface*, vol. 38/5. IEEE transactions on industry applications, p. 1152-1159, Sept. et Oct. 2002.
- [57] E. J. Cegnar, H. L. Hess, and B. K. Johnson, *A purely ultracapacitor energy storage system for hybrid electric vehicle utilizing a*

- microcontroller-based dc-dc boost converter*. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Idaho, Moscow, 2004.
- [58] A. Hammar, R. Lallemand, G. Coquery, J. Chabas, P. Venet, and G. Rojat, *Assessment of electrothermal model of supercapacitors for railway applications*. European conference on power electronics and applications, 2005.
 - [59] P. Barrade, *Series connexion of supercapacitors : Comparative study of solutions for the active equalization of the voltage*. 7th international conference on modeling and simulation of electrical machines, Montréal, Canada, 2002.
 - [60] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, and R. De Doncker, *Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems*. Industry applications, IEEE transactions, Volume 41, Issue 5, 2005.
 - [61] A. Burke, *The present and projected performance and cost of double-layer pseudo-capacitive ultracapacitors for hybrid vehicle applications*. Vehicle power and propulsion, IEEE conference, 2005.
 - [62] Bombardier, *Propulsion et contrôles : Solution Bombardier Mitrac Energy Saver*. Bombardier, 2008.
 - [63] M. Steiner and J. Scholten, *Energy storage on board of railway vehicles*. EPE 2005, Dresden, 2005.
 - [64] K. Rechenberg and M. Gaudenz, *System variants for operation of trams without a catenary*. ESSCAP 2004 : 1st European symposium on supercapacitors and applications, Belfort, France, 2004.
 - [65] M. Steiner, J. Scholten, and M. Klohr, *Energy storage on board of railway vehicles*. ESSCAP 2006 : 2nd European symposium on supercapacitors and applications, 2-3 November, Lausanne, Switzerland, 2006.
 - [66] M. Steiner and J. Scholten, *Energy storage on board of DC fed railway vehicles*. PESC 2004 : Power electronics specialist conference, Aachen, 2004.
 - [67] M. Steiner and J. Scholten, *Energy storage on board of railway vehicles*. ESSCAP 2004 : 1st European symposium on supercapacitors and applications, Belfort, France, 2004.

-
- [68] W. Evers, *Energy storage on board of trolleybuses*. ESSCAP 2006 : 2nd European symposium on supercapacitors and applications, 2-3 November, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [69] A. Lohner and W. Evers, *Intelligent power management of a supercapacitor based hybrid power train for light-rail vehicles and city busses*. PESC 2004 : Power electronics specialist conference, Aachen, Germany, 2004.
- [70] C. Fahrni, *Principe d'alimentation par convertisseurs multiniveaux à stockage intégré - Application aux accélérateurs de particules*. Thèse EPFL-STI-ISE-LEI, 2008.
- [71] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, *Energy storage systems for advances power applications*, vol. 89. Proceedings of the IEEE, p. 1744-1756, Dec. 2001.
- [72] T. Christen and M. Carlen, *Theory of Ragone plots*. Journal of power sources, Volume 91, Issue 2, p. 210-216, Dec. 2000.
- [73] W. Günselmann, *Technologies for increased energy efficiency in railway systems*. EPE 2005, Dresden, 2005.
- [74] B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, and M. Klohr, *Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network*. EPE 07 : 12th European conference on power electronics and applications, Aalborg, Denmark, 2007.
- [75] The MathWorks, *Simulink ; Computation, visualization, programming ; Using Simulink ; Version 2*. The MathWorks, 1996.
- [76] The MathWorks, *Simulink ; Modeling, simulation, implementation ; Writing S-functions ; Version 3*. The MathWorks, 1998.
- [77] F. Gardiol, *Electromagnétisme ; Volume 3*. Traité d'électricité, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1996.
- [78] A. Rufer and H. Ravokatrosolofo, *Static converter for complementary energy storage with batteries and supercapacitors*. PCIM 99 : International conference on power electronics, intelligent motion and power quality, Nürnberg, Germany, 1999.
- [79] R. Li, A. Pottharst, N. Fröhleke, J. Böcker, K. Witting, M. Dellnitz, O. Znamenshchykov, and R. Feldmann, *Design and implementation of a hybrid energy supply system for railway vehicles*. White paper, Maxwell technologies, 2007.

- [80] L. Palma, P. Enjeti, and J. Howze, *An approach to improve battery run-time in mobile applications with supercapacitors*. PESC 03, Power electronics specialist conference, 2003.
- [81] S. Pay and Y. Baghzouz, *Effectiveness of battery-supercapacitors combination in electric vehicles*. Power tech conference proceedings, Bologna, 2003.
- [82] H. N. Nagaraja, D. Kastha, and A. Patra, *Generalized analysis of integrated magnetic components based low voltage interleaved DC-DC buck converter for efficiency improvement*. ISCAS 2005 : IEEE international symposium on circuits and systems, p. 2485-2489, May 2005.
- [83] B. Vulturescu, A. De Bernardinis, R. Lallemand, and G. Coquery, *Traction power converter for PEM fuel cell multi-stack generator used in urban transportation*. European conference on power electronics and applications, 2007.
- [84] A. Rufer and J.-M. Meyer, *A high current, low ripple, low weight PFC rectifier using a standard power module*. PCIM 98 : International conference on power electronics, intelligent motion and power quality, Nürnberg, Germany, 1998.
- [85] B. Dang, Y. Lembeye, J.-P. Ferrieux, and J. Barbaroux, *Optimisation de l'interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible*. EPF 2006 ; 11ème édition, Electronique de puissance du futur, 5-6 Jul, Grenoble, France, 2006.
- [86] J.-J. Huseltein, C. Gauthier, and C. Glaize, *Use of the MOSFET channel reverse conduction in an inverter for suppression of the integral diode recovery current*, vol. 2. Fifth European conference on power electronics and applications, p. 431-436, Sept. 1993.
- [87] S. Linder, *Power semiconductors*. Electrical Engineering, ISBN 0-8247-2569-7, EPFL Press, 2006.
- [88] L. Fleischli, S. Lemofouet, and A. Rufer, *Multichannel DC-DC converter's efficiency optimisation by variable number of active channels*. ESSCAP 2006 : 2nd European symposium on supercapacitors and applications, 2-3 November, Lausanne, Switzerland, 2006.

Curriculum Vitae

Blaise Destraz

né le 26 octobre 1979

Formation et activités professionnelles

Dès 2003	Assistant et doctorant au Laboratoire d'Electronique Industrielle, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
2003	Travail de diplôme sur l'assistance énergétique pour un train diesel-électrique
1999 - 2003	Diplôme d'Ingénieur Electricien EPFL, niveau master, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
1995 - 1999	Gymnase cantonal en section scientifique, Burier

Langues

Français	Langue maternelle
Anglais	Bon
Allemand	Connaissances scolaires

Publications représentatives

1. *Utilisation du stockage supercapacitif dans le domaine traction*, B. Destraz, Bulletin de l'association Suisse des Electriciens et de l'association des entreprises Electriques Suisses (ASE/AES), No. 3, 13 février 2004, p.19-26
2. *Supercapacitive Energy Storage for Diesel-Electric Locomotives*, B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, SPEEDAM 2004 : Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 16-18 June, Capri, Italy
3. *Power Assistance for Diesel Electric Locomotives with Supercapacitive Energy Storage*, B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, IEEE-PESC 04 : Power Electronics Specialist Conference, 20-25 June, Aachen, Germany
4. *A solution for Increasing the Efficiency of Diesel-Electric Locomotives with Supercapacitive Energy Storage*, B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, ESSCAP 2004 : 1st European Symposium on Supercapacitors and Applications, 4-5 November, Belfort, France
5. *Hybrid vehicle in railways applications : supercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives*, P. Barrade, B. Destraz, A. Rufer, IEEE-VPP 04 : Vehicular Power and Propulsion Symposium, 6-8 October, Paris, France
6. *A New Solution for Increasing the Efficiency of an Electrical Scooter with Supercapacitors through a Novel, Interleaved Multi-Channel DC/DC converter*, B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, 6th Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems ELECTRO-MOTION 2005, 27-29 Septembre 2005, Lausanne, Switzerland
7. *A New Interleaved Multi-channel DC/DC Converter Specially Dedicated to Low Voltage, high current applications*, B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, PCIM 2006 : Power Electronics Intelligent Motion Power Quality, 30 May - 1 June 2006

-
8. *High Efficient Interleaved Multi-channel DC/DC Converter Dedicated to Mobile Applications*, B. Destraz, Y. Louvrier, A. Rufer, IEEE Industry Applications Society 41st Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 8-12 October 2006
 9. *Study and Simulation of the Energy Balance of an Urban Transportation Network*, B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, M. Klohr, EPE 2007 - 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2 - 5 September 2007
 10. *En route avec un train hybride diesel-électrique*, A. Rufer, P. Barrade, B. Destraz, M. Capezzali, AGEFI Magazine - Dossier : Le stockage de l'énergie, 01/2008
 11. *Application de supercondensateurs dans le transport individuel : Etude expérimentale d'un scooter électrique avec assistance en puissance*, P. Barrade, B. Destraz, S. Hauser, A. Rufer, Bulletin de l'association Suisse des Electriciens et de l'association des entreprises Electriques Suisses (ASE/AES), No. 1, 2008